

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

OPTICKÉ INFRASTRUKTURY PRO MOBILNÍ SÍŤ PÁTÉ GENERACE (5G)

OPTICAL INFRASTRUCTURES OF 5TH GENERATION MOBILE NETWORKS (5G)

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Matúš Jančošek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Látal, DiS.

BRNO 2021

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Telekomunikační a informační systémy**

Ústav telekomunikací

Student: Matúš Jančošek

ID: 211257

Ročník: 3

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Optické infrastruktury pro mobilní sítě páté generace (5G)

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je rozbor problematiky využití optických infrastruktur pro mobilní sítě 5. generace (5G). Bakalářská práce bude zaměřena na analýzu jak současného stavu řešení, tak na návrh nových metod přenosu (nestandardní vlnové délky, modulační formáty vyšších řádů, nové typy optických vláken apod.). V rámci praktické části budou jednotlivé návrhy podrobeny simulaci v simulačním programu VPIphotonics. Práce bude obsahovat vyhodnocení výsledků měření a srovnání s teoretickými předpoklady.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] FILKA, Miloslav. 2017. Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku. Druhé, rozšířené vydání. Brno: Prof. Ing. Miloslav Filka, Csc. a kol. ISBN 978-808-6785-141
- [2] TZANAKAKI, A., M. VARVARIGOS, R. MUÑOZ, R. NEJABATI, N. YOSHIKANE, M. ANASTASOPOULOS and J. MARQUEZ-BARJA. 2020. Optical Network Design and Modeling: 23rd IFIP WG 6.10 International Conference, ONDM 2019, Athens, Greece, May 13–16, 2019, Proceedings: Lecture Notes in Computer Science. Springer International Publishing. ISBN 9783030380854

Termín zadání: 1.2.2021

Termín odevzdání: 31.5.2021

Vedoucí práce: Ing. Michal Látal, DiS.

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Bakalárska práca sa zaoberá analýzou súčasného stavu optických sietí, pre využitie v telekomunikáciách. Nachádza sa tu analýza súčasného stavu optických sietí a porovnanie posledných dvoch generácií mobilných sietí. Hlavnou časťou práce je simulácia optického prenosu. Porovnávané sú tri rôzne typy modulácií, tri rôzne typy optických vlákien podľa typu ITU-T a štyri rôzne vlnové dĺžky, ktoré prezentujú štandardné a neštandardné vlnové dĺžky. Druhou simuláciou je porovnanie modulácií a vplyv vzdialenosti na bitovú chybovosť. Výsledky analýz sú znázornené v tabuľkách.

KĽÚČOVÉ SLOVÁ

optické vlákno, 5G, vlnové dĺžky, modulácie, 16QAM, 64QAM, DQPSK, typy vlákien, simulácia, analýza, VPIphotonics

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with the analysis of the current state of optical networks used in telecommunications. There is an analysis of the current state of optical networks and a comparison of the last two generations of mobile networks. The main part of the work is the simulation of optical transmission. Three different types of modulations are compared, three different types of optical fibers according to the ITU-T type and four different wavelengths, which present standard and non-standard wavelengths. The second simulation is a comparison of modulations and the effect of distance on bit error rate. The results of the analyses are presented in the tables.

KEYWORDS

optical fiber, 5G, wavelengths, modulations, 16QAM, 64QAM, DQPSK, fiber types, simulation, analysis, VPIphotonics

JANČOŠEK, Matúš. *Optické infrastruktury pro mobilní sítě páté generace (5G)*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2021, 53 s. Bakalárska práca. Vedúci práce: Ing. Michal Látal, DiS.

Vyhlásenie autora o pôvodnosti diela

Meno a priezvisko autora: Matúš Jančošek
VUT ID autora: 211257
Typ práce: Bakalárska práca
Akademický rok: 2020/21
Téma závěrečné práce: Optické infrastruktury pro mobilní sítě
páté generace (5G)

Vyhlasujem, že svoju záverečnú prácu som vypracoval samostatne pod vedením vedúcej/cého záverečnej práce, s využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej záverečnej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto záverečnej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona Českej republiky č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka Českej republiky č. 40/2009 Sb.

Brno
.....
podpis autora*

*Autor podpisuje iba v tlačenej verzii.

POĎAKOVANIE

Rád by som poďakoval vedúcemu semestrálnej práce Ing. Michalovi Látalovi za odborné vedenie, konzultácie, trpezlivosť a podnetné návrhy k práci.

Obsah

| | |
|--|-----------|
| Úvod | 10 |
| 1 Optoelektronika | 11 |
| 1.1 Optické vlákno | 12 |
| 1.2 Optické vysieláče | 13 |
| 1.3 Optické detektory | 14 |
| 1.4 Prenosové vlastnosti optických vlákien | 15 |
| 2 Optické komunikačné systémy | 16 |
| 2.1 Vlnové dĺžky | 16 |
| 2.2 Typy optických vlákien | 17 |
| 2.3 Modulačné formáty | 20 |
| 3 Porovnanie 4G a 5G sietí | 24 |
| 3.1 Technológie prenosu | 25 |
| 3.2 Architektúra základňovej stanice | 26 |
| 3.3 Baseband Unit (BBU) | 28 |
| 3.4 Remote radio head (RRU) | 29 |
| 4 5G siete | 30 |
| 4.1 Technológia 5G | 30 |
| 4.2 Optická infraštruktúra v SR | 31 |
| 4.3 eCPRI | 32 |
| 4.4 Optická sieť | 32 |
| 4.4.1 DWDM | 33 |
| 4.4.2 UDWDM | 34 |
| 4.4.3 NG-PON2 | 34 |
| 5 Návrh optickej infraštruktúry pre 5G | 35 |
| 5.1 Topológia | 36 |
| 5.2 Postup | 38 |
| 5.3 Simulácia | 39 |
| Záver | 46 |
| Literatúra | 47 |
| Zoznam symbolov a skratiek | 51 |

Zoznam obrázkov

| | | |
|-----|---|----|
| 1.1 | Zapojenie optického spoja. | 12 |
| 1.2 | Lom svetla v optickom vlákne. | 13 |
| 2.1 | Konstelačný diagram pre modulácie 16QAM a 64QAM. | 22 |
| 2.2 | Konstelačný diagram pre DQPSK. | 23 |
| 3.1 | Prehľad poskytovaných služieb naprieč generáciami [16]. | 24 |
| 3.2 | Prehľad zapojenia základňových staníc. | 27 |
| 3.3 | Prehľad zapojenia 5G BTS. | 27 |
| 4.1 | DWDM architektúra [30]. | 33 |
| 5.1 | Pracovná plocha VPIphotonics. | 35 |
| 5.2 | Topológia optickej siete. | 38 |
| 5.3 | Porovnanie konštelačného diagramu pre BER 10^{-26} a 10^{-1} | 40 |
| 5.4 | Porovnanie konštelačného diagramu pre BER 10^{-5} a 10^{-1} | 42 |
| 5.5 | Porovnanie konštelačného diagramu pre BER 10^{-247} a 10^{-1} | 43 |
| 5.6 | Graf závislosti vzdialenosti na bitovej chybovosti. | 45 |

Zoznam tabuliek

| | | |
|-----|---|----|
| 2.1 | Prehľad hlavných prenosových parametrov. | 20 |
| 3.1 | Prehľad vlnových dĺžok [1]. | 25 |
| 3.2 | Prehľad rýchlosti prenosu [1]. | 25 |
| 3.3 | Porovnanie kľúčových parametrov 4G a 5G [18]. | 26 |
| 3.4 | Typy buniek [20]. | 28 |
| 5.1 | Parametre vysielacza. | 36 |
| 5.2 | Parametre vlákna v topológii. | 37 |
| 5.3 | Výsledky simulácie pre 16QAM. | 39 |
| 5.4 | Výsledky simulácie pre 64QAM. | 41 |
| 5.5 | Výsledky simulácie pre DQPSK. | 42 |
| 5.6 | Porovnanie modulácií s chybovosťou BER pre 16QAM, 64QAM a DQPSK. | 44 |

Úvod

O mobilných sieťach piatej generácie sa začalo rozprávať už pred pár rokmi. Za posledné roky sa udiali mnohé kroky k tomu, aby sa technológia 5G dostala medzi ľudí a začali ju naplno využívať. Hlavné kroky k spusteniu 5G sietí vykonali výrobcovia prístupových technológií, ďalej sú to výrobcovia zariadení, ktoré dokážu pracovať s touto technológiou a v neposlednom rade sú to Regulačné úrady každého štátu, ktorý draží vysielacie frekvencie pre poskytovateľov telekomunikačných služieb.

Veľmi dôležitou súčasťou v budovaní mobilných sietí 5. generácie je nevyhnutnosť prepojenia základňových staníc s centrálou operátora práve optickou sieťou. V najbližších rokoch budú telekomunikačné spoločnosti hľadať riešenia ako vylepšiť ich súčasnú sieť alebo bude potrebné budovanie nových sietí. Práve optické siete sú budúcnosťou pre telekomunikáciu, spĺňajú všetky potrebné prenosové parametre. V tejto bakalárskej práci sa rozoberie problematika využitia optickej vláknovej infraštruktúry v mobilných prístupových sieťach 5. generácie.

V prvej kapitole teoretickej časti práce sa opisuje vývoj optickej prístupovej siete, jej princíp, aké prvky tvorí táto sieť, ktoré sú potrebné poznať pre správne chápanie tejto problematiky. Druhá kapitola bakalárskej práce približuje problematiku vlnových dĺžok, rôznych typov jednovidových optických vlákien a na záver kapitoly aj porovnanie modulácií využívaných v bežných optických systémoch, ale aj v tých vysokorýchlostných. V tretej kapitole sa porovnávajú dve súčasné mobilné generácie 4G a 5G. Táto kapitola popisuje na akom princípe fungujú obe generácie, aké majú rozdiely a čo majú spoločné. Následne sa táto kapitola zaoberá aj ich nadväznosť na optické siete, najmä na ich terajšie prenosové kapacity, ako je rýchlosť, odozva a dostupnosť. Spomína sa tu súčasný stav optických sietí na Slovensku a ako príklad sú uvedené dve telekomunikačné firmy s rozličným zameraním poskytovaných služieb. Nasledujúca kapitola je zameraná len na mobilné siete 5. generácie. Opisuje sa tu na akom princípe fungujú, aké má požiadavky na optické siete ale aj inovácie, ktoré sa zaviedli práve nasadením tejto generácie sietí.

Praktická časť bakalárskej práce je zameraná na simuláciu optického systému pre mobilné siete 5. generácie. V tejto časti je priblížený program VPIphotonics, využívaný na simuláciu a analýzu optických systémov. Praktická časť začína opisom prostredia simulátora a následne detailným opisom navrhutej topológie. V ďalšej časti sú priblížené samotné simulácie a ich výsledky sú vložené do tabuliek. Simulácií podliehajú tri rôzne modulácie, 16QAM, 64QAM a DQPSK. Na týchto simuláciách sú ďalej otestované tri typy optických vlákien G.652.D, G.655.D, G.657.A. Pre každú moduláciu a optické vlákno sú následne testované štyri vlnové dĺžky 1600 nm, 1550 nm, 1310 nm a 1360 nm. Výsledky analýz sú navzájom porovnané a okomentované.

1 Optoelektronika

Svoj vývoj začala optoelektronika v 19. storočí objavením fotónu. Fotóny sú v optike nosičmi signálu. Pred ním ľudia využívali na prenos informácií dymové signály alebo rôzne zrkadlá, ktoré odrážali slnečné žiarenie. Alexander Grehem Bell využil práve tento systém slnka a zrkadiel na prenos fotónov. Tento systém dokázal fungovať až na vzdialenosť 200 m a to všetko len za predpokladu dobrých poveternostných podmienok. Vývoj optoelektroniky rozdeľujeme na päť generácií [1].

Prvá generácia optického prenosového systému sa zameriavala na prenosovú kapacitu. V tých rokoch dosahovala svoje maximum na hranici 1 Gbit/s. Signál sa vysielal na vlnových dĺžkach $\lambda = 800$ nm a $\lambda = 1300$ nm. Zdrojom vysielania bola LED dióda (Light-Emitting Diode) [2].

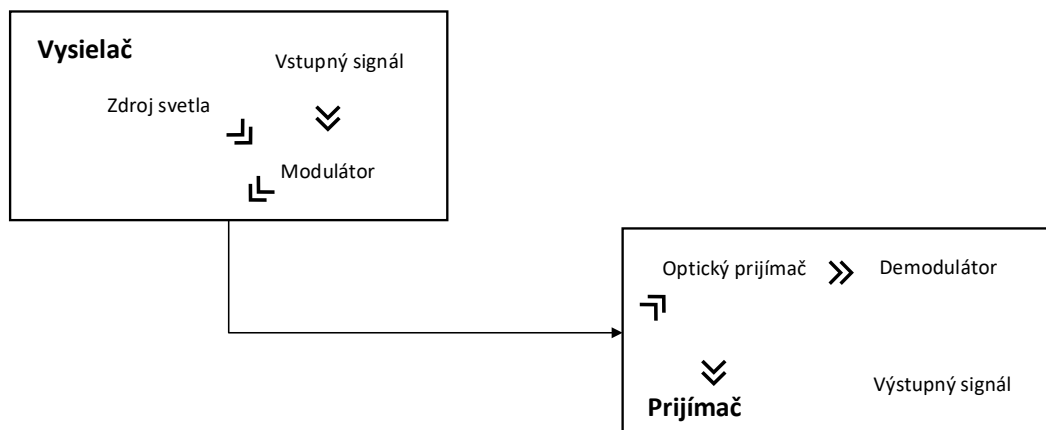
Druhá generácia sa vyznačovala nahradením mnohovidových vlákien so spojitým indexom lomu za jednovidové v dôsledku čoho došlo k zvýšeniu kapacity z 1 na 10 Gbit/s. Ďalším veľkým posunom v pred bolo použitie laserových diód.

Tretia generácia priniesla vylepšenie z pohľadu jednovidových vlákien a ich výroby. Začali sa vyrábať z veľmi čistého kremenného skla a tým nastal začiatok využívania vlnových dĺžok od 1300 do 1600 nm.

Štvrtá generácia priniesla inovovanejšie prenosové systémy a citlivejšie prijímače v optickej prenosovej sústave.

Piata generácia priniesla zlepšenie z pohľadu prenosu signálu na dlhšie trasy bez nutnosti použitia opakovačov. Toto dokázali zabezpečiť optické zosilňovače s vláknami dopovanými erbiom. Vďaka tomuto zariadeniu sa vlákno, ktoré je dopované dokáže obnovovať. To malo za následok aj zväčšenie kapacity siete na desiatky Gbit/s.

Prenos po optickom vlákne je zabezpečený vďaka optickým zariadeniam. Ako zdroj svetelného signálu sa využívajú optické vysielacie. Tie majú za úlohu vysieľať svetelný lúč, tvorený neutrálnymi fotónmi, ktoré na seba navzájom nepôsobia. Svetelný lúč je ďalej prenášaný optickým prenosovým prostredím. V určitých prípadoch je potrebné signál po ceste k optickému prijímaču signál zosilniť keďže sa tlmí a to majú za úlohu zosilňovače. V minulosti sa na to využívali elektro optické detektory. Nevýhoda bola v tom že elektróny v porovnaní so svetlom sú pomalé, preto sa nahradili vláknovými zosilňovačmi. Pri prechode signálu aktívnym médium sa potlačí vysoko energetický prvok do základného stavu a zvýši svoju intenzitu, tým pádom sa signál zosilní po prechode vláknom, ktoré je dotované vzácnym prvkom, napríklad erbiom. Na konci optickej trasy sa nachádza optický prijímač, ktorý má za úlohu spoločne s vysielacom previesť optický signál s čo najmenšími stratami. Prijímač premieňa svetelný signál späť na elektrický signál, s ktorým dokážu pracovať aj ďalšie prvky v sieti vid' obr. 1.1.



Obr. 1.1: Zapojenie optického spoja.

1.1 Optické vlákno

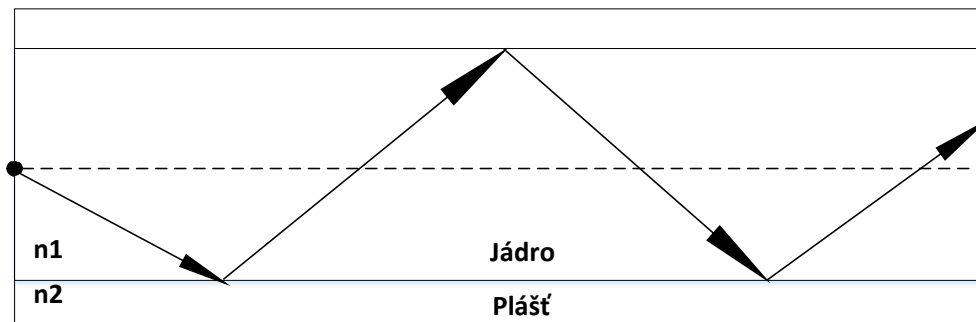
Optické vlákno tiež často nazývané aj optický vlnovod alebo svetlovod prenáša svetelné signály na veľmi veľké vzdialenosti. Oproti svojim predchodcom z pohľadu telekomunikácií, čím boli metalické káble. Ich hlavnou výhodou je predovšetkým značná prenosová kapacita, je tu zamedzené elektromagnetické rušenie a z toho dôvodu nevplýva na fungovanie optickej siete. Medzi ďalšie veľké výhody optického vlákna pred použitím metalických káblov je aj odolnosť voči odpočúvaniu, menšia hmotnosť a rozmery. Obrovskou nevýhodou je cena výroby vlákien, meracej techniky a náročné spájanie vlákien.

Optické vlákno je rúrka vyrobená z kremičitého skla alebo z plastu a má hrúbku niekoľko μm . Vlákno je obalené ďalším materiálom, ktorým môže byť guma alebo plast. Tento materiál má taktiež vlastný index lomu, ktorý býva menší ako práve materiál samotného vlákna. Svetlo sa vo vnútri vlákna odráža na rozhraní materiálov pod dostatočným uhlom a tým nastáva úplný odraz. Vďaka týmto odrazom sa svetlo šíri až na koniec vlákna. Keďže optický prenos funguje vďaka odrazom, je veľmi podstatné ako sa používa a ako sa s ním narába. Ohyb vlákna spôsobuje najväčšie straty pri prenose. Pri rovnom vlákne nastáva úplný odraz, avšak pri ohnutí sa dopadajúce svetlo odráža len čiastočne a to spôsobuje že časť svetla unikne. Každé optické vlákno dovoľuje určitý ohyb pri pokládke vlákna. Táto hodnota nie je univerzálna a každé optické vlákno je svojim technickým vyhotovením unikátne.

Optické vlákno je využívané na telekomunikačné účely pri budovaní vysokorychlostných sietí ale najmä pri prepájaní jednotlivých základňových staníc s centrálou mobilného operátora. Signál šíriaci sa vláknom následne dostáva cez BTS (Base Transceiver Station) do našich mobilných zariadení alebo pre internetové pripojenie

do domácností. Svoje uplatnenie však nájdú aj vo vojenských zariadeniach, automobilovom či leteckom priemysle. V medicíne ich nájdeme pri endoskopických vyšetreniach. Vláknové senzory sa používajú pre detekciu chemikálií v životnom prostredí a v priemysle.

Svetlo sa vo vlákne šíri pomocou ciest viď obr. 1.2. Ak má jadro dostatočný priemer umožňuje šírenie svetla vo viacerých cestách alebo vidoch. V prípade, že vlákno obsahuje len jeden prúd dát, nazýva sa jednovidové v opačnom prípade hovoríme o mnohovidových vláknach.



Obr. 1.2: Lom svetla v optickom vlákne.

Jednovidové vlákno, ktoré sa využíva predovšetkým pri diaľkových prenosoch najmä vďaka vlastnostiam ktoré ponúka. Má vysoké prenosové rýchlosti a veľkú šírku pásma. Dosahovaný útlm je menší oproti mnohovidovým optickým vláknam. Z toho dôvodu sa signál týmto vláknom šíri bez použitia zosilňovača až niekoľko desiatok kilometrov. Samozrejme s opakovačom sa táto vzdialenosť násobne zvyšuje. Priemer vlákna je 7-9 μm v jadre a plášť má priemer 125 μm . z dôvodu takéhoto malého priemeru dokáže byť vo vlákne len jedna cesta. Bežný útlm optického vlákna má hodnotu 0,2 dB/km pri vlnovej dĺžke 1550 nm a šírke pásma 10 GHz.

1.2 Optické vysielacie

Zdroj optického žiarenia patrí medzi najzákladnejšie časti optického prenosu. Na zdroj žiarenia vplývajú rôzne faktory ako:

- okolité prostredie,
- teplota,
- tlak,

- teplotná stabilita parametrov svetla,
- modulovateľnosť,
- výber vlnových dĺžok s najmenším tlmením.

V optických sieťach sa využívajú najmä luminiscenčné diódy alebo lasery. Oba tieto prvky majú svoje vlastné špecifiká a využívajú sa v rozdielnych typoch sietí. Luminiscenčné diódy (LED) sú zdrojom nekoherentného žiarenia, rekombinujú elektrón s dierou, vzniká energia, ktorá sa rovná šírke zakázaného pásma. LED diódy sa využívajú najmä v sieťach s nižšou hustotou a na menšie vzdialenosti. Majú malé rozmery, ľahko sa prepájajú na optické vlákna. Spoločnou vlastnosťou ILD (Injection Laser Diode) a LED diód je ich fungovanie pri nízkych prúdoch. Najpoužívanejšími vlnovými dĺžkami sú 850 nm, 1310 nm a 1550 nm. Pri používaní týchto vlnových dĺžok sa dosahujú najmenšie hodnoty útlmu. ILD diódy sa vyznačujú vysokým vyžarovacím výkonom a to ich predurčuje na použitie v sieťach na veľké vzdialenosti a rádovo desiatky až stovky kilometrov. Taktiež majú skvelú náväznosť na optické vlákno. Nevýhodou je potreba vyššieho napájania a vyšších prevádzkových teplôt. Obstarávacie ceny týchto zariadení hrajú v neprospech voči ILD diódam.

1.3 Optické detektory

Medzi najzákladanejšie prvky optickej siete nepochybne patrí aj detektor optického žiarenia. Už z názvu vyplýva, že ich hlavnou úlohou je detekovať žiarenie na konci optického vlákna a následne preniesť optický signál na elektrický. V praxi sa môžeme stretnúť s viacerými typmi detektorov, ktoré musia mať viaceré spoločné vlastnosti, aby boli spoľahlivé:

- vysokú citlivosť,
- dostatočnú šírku prenášaného kmitočtového pásma,
- rýchlu časovú odozvu,
- malý útlm,
- malé rozmery,
- necitlivosť na tepelné zmeny,
- veľká spoľahlivosť a životnosť.

V optickými sieťach sa používajú najmä dva druhy fotodiód. Jedná sa o fotodiódu PIN a lavínová fotodióda. Lavínová fotodióda je typ detektora, ktorý má vysokú citlivosť a preto svoje uplatnenie nájde predovšetkým v optických trasách na veľmi veľké vzdialenosti. Nevýhodou je technický náročná výroba, z toho dôvodu je ich cena vyššia. Fotodióda PIN dokáže detekovať veľmi malé signály a používa sa skôr na krátke optické trasy.

1.4 Prenosové vlastnosti optických vlákien

Optické vlákno je v prenosovom systéme vnímané ako prenosové médium. Jeho úlohou je prenášať zdroj svetla od optického vysielača žiarenia až po optický detektor. Cieľom prenosu je dosiahnuť v priebehu šírenia vlákna minimálne skreslenia a čo najvyššie rýchlosti aké dokáže daná technológia dosiahnuť. Existuje mnoho javov a príčin, ktoré môžu ovplyvniť prenos optickým káblom a vznikajú pri celom procese prenosu. Niektorým neočakávaným prekážkam sa dá už v príprave siete predísť avšak s niektorými treba dopredu počítať a následne sieť optimalizovať.

Disperzia je jav, následkom ktorého vzniká skreslenie signálu a časové rozšírenie. Definuje sa ako rozdiel šírky impulzu v polovici výšky, na konci a na začiatku vlákna. Pomocou disperzie sa určuje šírka prenášaného pásma s prenosová rýchlosť. Svetelný impulz je vyslaný zdrojom žiarenia, ktorý tvorí viacero vidov. Každý vid má vlastnú vlnovú dĺžku a každý vid vstupuje do vlákna pod iným uhlom. Vo vnútri vlákna sa teda signál šíri rôznymi rýchlosťami a na konci vlákna sa neodrazí v rovnaký čas, ale v určitom časovom intervale. Poznáme viacero druhov disperzií:

- **Materiálová disperzia** - materiál, ktorý je použitý na výrobu vlákna má index lomu závislý na vlnovej dĺžke, preto sú rýchlosti jednotlivých zložiek vysielaného signálu rôzne.
- **Vlnová disperzia** - táto disperzia má súvislosť s geometrickými vlastnosťami vlákna, tie majú vplyv na kmitočet jednotlivých vidov a rýchlosť šírenia signálu v nich. Prejavuje sa tu každá nepresnosť z výroby.
- **Chromatická disperzia** - prenášanú rýchlosť obmedzuje najviac chromatická disperzia, vzniká keď sa spojí materiálová a vlnová disperzia. Výrazne sa prejavuje ak jednotlivé farebné zložky svetla šíria rozdielne rýchlosti.
- **Polarizačná vidová disperzia** - táto disperzia sa taktiež prejavuje pri mikroohyboch vlákna ako pri vlnovej disperzii. Polarizačná vidová disperzia sa prejavuje najmä pri mnohovidových vláknach.

Útlm optického vlákna je spôsobený absorpciou okolitého prostredia, v ktorom sa signál šíri. Nezanedbateľnú úlohu pri útlme zohrávajú aj iné vlastnosti vlákna, ktoré ľahko ovplyvniť. Sú to rôzne ohyby pri manipulácii s káblom, pri pokládke alebo narušení jeho geometrie. Je to pomer výstupného výkonu ku vstupnému výkonu a udáva sa v dB/km. Útlm je závislý na vlnovej dĺžke, pretože absorpcia a rozptyl, ktoré to zapríčiňujú, sú spektrálne závislé. Prejavom absorpcie v optických vláknach je pohlcovanie a zoslabovanie optického signálu, ktorý prechádza vláknom. Najväčší vplyv na absorpciu má technológia výroby káblu a materiál, z ktorého je vyrobený. Ak je daný typ vlákna vyrobený z prímiesí, tak práve tieto zapríčiňujú tepelné straty.

2 Optické komunikačné systémy

2.1 Vlnové dĺžky

Medzi najdôležitejšie parametre optického prenosu patrí hodnota vlnovej dĺžky. Je to vzdialenosť medzi susednými vrcholmi vedľa seba idúcich cyklov, ktoré sa šíria pomocou vlny v optickom kábli. Za definíciu vlnovej dĺžky sa dá považovať svetlo, keďže aj svetlo má svoju vlnovú dĺžku. V prípade optických prenosov sa jedná o infračervenom spektre. V optických komunikačných systémoch sa využíva vlnová dĺžka v rozsahu 800-1600 nm. Medzi tie najbežnejšie patria 850 nm, 1300 nm a 1550 nm. Ak je prenos zložený z mnohovidového vlákna, používajú sa vlnové dĺžky 850 nm a 1300 nm. V prípade jednovidového vlákna je to 1310 nm a 1550 nm. Použitie štandardných vlnových dĺžok je podmienené vyhnutím sa nežiadúcim vplyvom na prenos. Rozptyl a absorpcia sú najvýznamnejšie faktory, ktoré spôsobujú útlm. Štandardné vlnové dĺžky majú pri týchto hodnotách najmenší útlm, dosahujú najlepšie prenosové rýchlosti a najmenšiu stratovosť dát, s rastúcou vlnovou dĺžkou klesá hodnota útlmu. Pri vlnovej dĺžke 1310 nm je útlm 0,4 dB/km a pri vlnovej dĺžke 1550 nm je útlm na úrovni 0,2 dB/km.

Rastúcim počtom užívateľov ktorí využívajú služby mobilných operátorov sa zvyšujú nároky na kapacitu a stabilitu siete. Štandardným použitím v optických sieťach je vlnová dĺžka 1550 nm, ktorá dosahuje vynikajúce výsledky z pohľadu prenosových vlastností. Postupom času sa však začínajú implementovať dĺžky ako 1310 nm a 1450 nm. Využitie inej vlnovej dĺžky, ako tej štandardnej, prináša telekomunikačným spoločnostiam obrovskú výhodu v podobe ušetrených nákladov na budovanie novej ale modernizáciu stávajúcej siete.

Vlnová dĺžka 1310 nm dosahuje nízky útlm a najnižšiu hodnotu disperzie v jednovidových vláknach. Nulová disperzia sa dosahuje v rozmedzí 1310-1324 nm. Vlnová dĺžka 1312 nm dosahuje bez disperzie a kompenzácie vzdialenosť 190 km (SSMF (Standard Single Mode Fiber)). Na vzdialenosť 40-50 km sú vhodné vlnové dĺžky v rozsahu 1270-1362 nm. V súčasnosti sa tento kanál využíva najmä pre up-stream kanál v systémoch FTTH (Fiber to the Home), kde dosahuje rýchlosť 4x25 Gbit/s na vzdialenosť 50 km. Tento kanál nie je optimálny pre využitie v telekomunikačných sieťach a jeho nasadenie v budúcnosti je podmienené ďalším výskumom, ktorý by s použitím multiplexoru typu DWDM (Dense wavelength division multiplexing) dosahoval kapacitu v rozsahu Tbit/s a chybovosť BER na úrovni maximálne 10^{-9} [3].

Vlnová dĺžka 1550 nm je najpoužívanejším kanálom v jednovidovej optickej prenosovej sústave. Vďaka svojim prenosovým vlastnostiam ako, je napríklad najnižšia hodnota útlmu na jeden kilometer, dosahovanými prenosovými rýchlosťami alebo

nízkou chybovosťou BER (Bit Error Rate), ju telekomunikační operátori využívajú pri budovaní svojich sietí už od nástupu mobilných sietí LTE (Long Term Evolution). Zapríčinilo to najmä skokové zvýšenie počtu používateľov mobilných dát v prenosných zariadeniach a tým zvýšenie nároku na kapacitu siete. Útlm vlákna pri vlnovej dĺžke 1550 nm je 0,19-1,22 dB/km. V prípade vlnovej dĺžky 1625 nm je to 0,21-0,24 dB/km. Jednotlivé prenosové rýchlosti závisia od veľa faktorov. Jedným z nich je aj typ použitej modulácie, pri QAM (Quadrature Amplitude Modulation) modulácií sa dajú dosiahnuť prenosové rýchlosti na úrovni 800 Gbit/s. Vlnová dĺžka 1550 nm je najpoužívanejším typom kanálu z viacerých dôvodov. Prvým je, že rozsah 1550-1650 nm predstavuje pri dlhých trasách minimálnu stratu signálu. V prípade, že optická trasa má niekoľko stoviek kilometrov je potrebné použiť zosilňovače a v prípade, erbiom dopovaný zosilňovač je najúčinnější v tomto rozsahu. V neposlednom rade je to aj chromatická disperzia je dostatočne vysoká aby zabránila interferenciu medzi jednotlivými kanálmi v DWDM. Pri vlnovej dĺžke 1310 nm je disperzia nízka a jednotlivé kanály v multiplexore sa prekrývajú, dochádza tým k zbytočným stratám signálu a veľkej chybovosti [4].

Ďalšou nádejou pre budúcnosť optických sietí sú veľké vlnové dĺžky okolo 2000 nm. V kanáli 1950 nm a pri využití QAM modulácií dosahuje rýchlosti 20 Gbit/s. Útlm na danej vlnovej dĺžke je 2 dB/km

2.2 Typy optických vlákien

Optické vlákno je jednou z najdôležitejších súčastí optického prenosového systému. Jeho úlohou je prenášať svetelný signál od optického vysielača po optický prijímač. Existujú dva základné typy optického vlákna. Jednovidové a mnohovidové, ich použitie v sieti závisí od toho o aký komunikačný systém sa jedná. Jednovidové vlákna sa oproti mnohovidovému používajú skôr na dlhšie vzdialenosti a to až niekoľko desiatok alebo stoviek kilometrov. Je za potrebné aby toto vlákno malo čo najlepšie prenosové vlastnosti a tým sa zabezpečil bezstratový a rýchly prenos signálu. Práve jednovidové vlákna sa používajú na prepojenie základňových staníc s dátovým centrom u telekomunikačných operátorov. Z toho dôvodu sa postupom času začali vyvíjať mnohé kategórie jednovidového optického vlákna. Nové optické vlákna poskytujú nižšie koeficienty strát a vyššiu disperziu, napríklad zvýšením jeho efektívnej plochy (AEFF).

Efektívna plocha jednovidového optického vlákna určuje koľko energie môže uniesť jadro vlákna bez toho, aby spôsobilo straty signálu. Tento aspekt je dôležitý najmä pri používaní DWDM.

Optické vlákna sú podľa Medzinárodnej telekomunikačnej únie ITU (International Telecommunication Union) kódovo označované G.650-G.659. Tieto označenia

popisujú jednotlivé geometrické, mechanické a prevodové atribúty jednovidových optických vlákien.

Najčastejšie používaným typom jednovidového optického vlákna je ITU-T G.652. Toto vlákno sa vyznačuje nulovou disperziou pri vlnovej dĺžke 1310 nm, pre ktorú bol tento typ vlákna optimalizovaný. Neskôr sa na tomto vlákne začal prenášať aj signál s vlnovou dĺžkou 1550 nm. S vývojom vlákna G.652 sa začalo v roku 1984 a od tej doby sa vydalo už niekoľko jeho nástupcov ako je G.652.A, G.652.B, G.652.C, G.652.D. Všetky podkategórie majú rovnakú šírku jadra, ktorá je na úrovni 8–10 μm . Vlákna typu A a C sa zvyčajne používajú na siete s nižšími požiadavkami na PMD (Polarization mode dispersion). V súčasnej dobe sa preferuje typ D, pretože sa jedná o najnovší typ tejto kategórie a má najlepšie prenosové vlastnosti. Útlm vlákna je 0,4 dB/km pri vlnových dĺžkach 1310 nm a 1625 nm, pri 1550 nm a 1383 nm je to 0,3 dB/km. Polarizácia dosahuje v tomto prípade 0,2 ps/km². Ďalším prínosom je optimalizácia pre multiplexor a zníženie útlmu pre oblasť vlnovej dĺžky >1310 nm [5].

Vlákno typu ITU-T G.653 sa vyznačuje nulovou disperziou v oblasti s vlnovou dĺžkou 1550 nm, taktiež je hodnota útlmu v tejto oblasti najnižšia, približne 0,35 dB/km. V oblasti s vlnovou dĺžkou 1310 nm je útlm na úrovni 0,55 dB/km. V oblasti od 1460-1625 nm je prenos signálu prispôsobený na použitie multiplexoru CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing). Prvý krát bol tento typ vlákna popísaný v roku 1988. V neskorších rokoch pribudol aj novší typ vlákna G.653.B, pri ktorom sa zmenila hodnota PMD z 0,5 ps/km² na 0,2 ps/km² [6].

Typ ITU-T G.654 bol vyvinutý v roku 1988 a charakterizuje ho nulová disperzia v oblasti vlnovej dĺžky 1300 nm. Tento typ nízku stratovosť a preto sa využíva najmä v optických systémoch, ktoré dosahujú veľmi vysoké vzdialenosti. S týmto typom kábla sa stretneme najmä v podmorských inštaláciách. Koeficient PMD je na úrovni 0,5 ps/km², útlm je pri vlnovej dĺžke 1550 nm len 0,22 dB/km. Neskorším vývojom pribudli ďalšie podkategórie. Najvýznamnejšou je G.654.E, bol vydaný v roku 2016. Útlm tohto vlákna je 0,23 dB/km a disperzia sa znížila na 0,2 ps/km². Vyznačuje sa malým útlm a veľkou efektívnou plochou, čo napomáha k zníženiu strát signálu pri jeho prenose. Využitím tohto vlákna sa zlepšil prenos o 70% na veľmi dlhé vzdialenosti v porovnaní z vláknom G.652. Podľa posledných štúdií tento typ vlákna je schopný prenášať na vzdialenosť 2000 km s rýchlosťou prenosu 3,2 Tbit/s spolu so zosilňovačom EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) optický signál bez veľkých strát. Svoje využitie nájde práve v systémoch, ktoré prepájajú napr. medzinárodné dátové centrá alebo back houl sieť mobilného operátora [7].

Vlákno typu ITU-T G.655 je jednovidové optické vlákno, ktorého vývoj sa začal v roku 1996 a jeho posledná aktualizácia bola v roku 2009. Nenulová disperzia je v rozsahu 1530-1565 nm pri tomto rozsahu vlnových dĺžok dosahuje útlm hodnotu

0,23 dB/km a v prípade vlnovej dĺžky 1625 nm je útlm 0,25 dB/km. Postupom času pribudli ďalšie podkategórie, ktoré sa líšia svojimi prenosovými vlastnosťami. Tento typ vlákna je vhodný v kombinácii s multiplexorom DWDM. Koeficient PMD je na úrovni 0,2 ps/km², nezáleží na podkategórii pretože je vo všetkých rovnaký. Tento typ vlákna je po G.652 druhým nepoužívaným v optických infraštruktúrach [8].

Ďalším typom optického vlákna je ITU-T G.656. Je to jednovidové vlákno s nenulovou disperziou v rozmedzí 1460–1625 nm. Táto disperzia sa redukuje pri použití multiplexora DWDM. Útlm je na úrovni 0,4 dB/km pri vlnovej dĺžke 1460 nm a 1625 nm. Pri 1550 nm je to 0,35 dB/km. Koeficient PMD je 0,2 ps/km². Tento typ optického vlákna je predurčený najmä pre použitie s multiplexorom DWDM a CWDM [9].

Najnovším typom jednovidového optického vlákna je ITU-T G.657, ktorý bol vydaný v roku 2006 a jeho posledná aktualizácia prebehla v roku 2016. Tento typ kábla koncepčne vychádza zo štandardu ITU-T G.652. Využíva sa najmä v transportných optických sieťach alebo prístupových sieťach v interiéri budov, tzn. na konci prenosového systému. Existujú dve jeho kategórie A a B. Každá z kategórií má ešte svoje dve podkategórie. Typ A je optimalizovaný skôr na zníženie strát v prenose, vychádza z koncepcie ITU-T G.652.D a priemer vlákna sa pohybuje v pásme 7,5-10 mm. Nenulová disperzia je pri vlnovej dĺžke 1300 nm, útlm je na úrovni 0,4 dB/km pri použití v rozsahu 1310-1625 nm. Najnižší útlm nastáva pri vlnových dĺžkach 1550-1565 nm, kde dosahuje hodnotu 0,3 dB/km. PMD koeficient je na úrovni 0,2 ps/km². Kategória B je navrhnutá taktiež primárne na zníženie strát, využíva sa najmä v inštaláciách, kde je zvýšený polomer ohybu a vzdialenosť je menšia ako 1 km, tzn. na konci prístupových sietí, vo vnútri budov. Priemer vlákna je 5-7,5 mm a rozsah využitia vlnových dĺžok je 1260-1625 nm. Prenosové vlastnosti typu B sú takmer rovnaké ako pri type A. Jediná zmena nastáva pri koeficiente PMD, ten je na úrovni 0,5 ps/km². Kategória G.657 má v porovnaní s G.652 vyšší útlm, väčšie straty a využíva sa primárne na menšie vzdialenosti. Tento typ kábla je najpoužívaným typom v prístupových optických sieťach [10].

Tab. 2.1: Prehľad hlavných prenosových parametrov.

| Parameter | Detail | G.652.D | G.655.D | G.657.A |
|--|----------------------|---------|---------|---------|
| Priemerná oblasť prenosu | Vlnová dĺžka [nm] | 1310 | 1550 | 1310 |
| | Rozsah [μm] | 8,6-9,2 | 8-11 | 8,6-9,2 |
| | Tolerancia [μm] | ±0,4 | ±0,6 | ±0,4 |
| Priemer plášťa | Nominál [μm] | 125 | | |
| | Tolerancia [μm] | ±1 | | |
| Hraničná vlnová dĺžka | Maximálne [nm] | 1260 | 1450 | 1260 |
| Makroohybný útlm | Rádus [mm] | 30 | 30 | 10 |
| | Počet ohybov | 100 | 100 | 1 |
| | Pri 1625 nm [dB] | 0,1 | 0,1 | 0,2 |
| Koeficient tlmenia | Maximum [dB/km] (1) | 0,4 | 0,3 | 0,4 |
| | Maximum [dB/km] (2) | 0,3 | 0,35 | 0,3 |
| PMD koeficient | M [cables] | 20 | | |
| | Q [%] | 0,01 | | |
| | Maximum PMD [ps/√km] | 0,2 | | |
| (1)- Pre G.652.D a G.657.A platí 1310 nm. Pre G.655.D platí 1550 nm. | | | | |
| (2)- Pre G.652.D a G.657.A platí 1550 nm. Pre G.655.D platí 1625 nm. | | | | |

2.3 Modulačné formáty

Dopyt po ultra rýchlych optických sieťach, ktoré zabezpečujú rýchlu komunikáciu na veľké vzdialenosti je veľmi vysoký. Na zabezpečenie týchto potrieb sa vývoj a skúmanie nezameriava len na nové typy optických vlákien a hľadanie výhodných vlnových dĺžok ale aj na objavovanie nových modulačných formátov. Z tohto hľadiska môžeme moduláciu rozdeliť na dve základné skupiny. Analógová modulácia sa v moderných telekomunikačných systémoch nevyužíva, preto sa ňou táto práca nezaobera.

Najjednoduchšou digitálnou moduláciou je Amplitúdové kľúčovanie (ASK). Vo svojej podstate vychádza z amplitúdovej modulácie. Binárny signál nadobúda len dva stavy. Stav 1 je viditeľný pri vysielaní nosnej a stav 0 nastáva pri neprítomnosti signálu. Svojím základom je veľmi jednoduchá a v telekomunikačných sieťach nenájde svoje podstatné využitie.

Frekvenčné kľúčovanie (FSK) je ďalším typom digitálnej modulácie, ktorá je podobne ako ASK založená na dvoch stavoch 1 a 0. Nosný signál sa mení úmerne so zmenou digitálneho signálu. Výstupný signál má vysokú frekvenciu (väčšiu periódu signálu) v binárnej jednotke a nízku úroveň v binárnej nule. Tento typ kľúčovania sa taktiež označuje ako BFSK (Binary Frequency Shift Keying).

Fázové klúčovanie (PSK) je technika modulácie signálu, pri ktorej dochádza ku zmene fázy nosného signálu. V praxi sa klasická fázová modulácia veľa nevyskytuje, pretože je technicky dosť náročná a nevýhodná. Z toho dôvodu sa vyvinuli jej rovnocenné náhrady:

- **Viacstavová PSK**
- **Diferenciálna fázová modulácia DPSK (Differential Phase Shift Keying)**
- **Binárna BPSK**
- **Kvadratúrna QPSK (Quadrature Phase Shift Keying).**

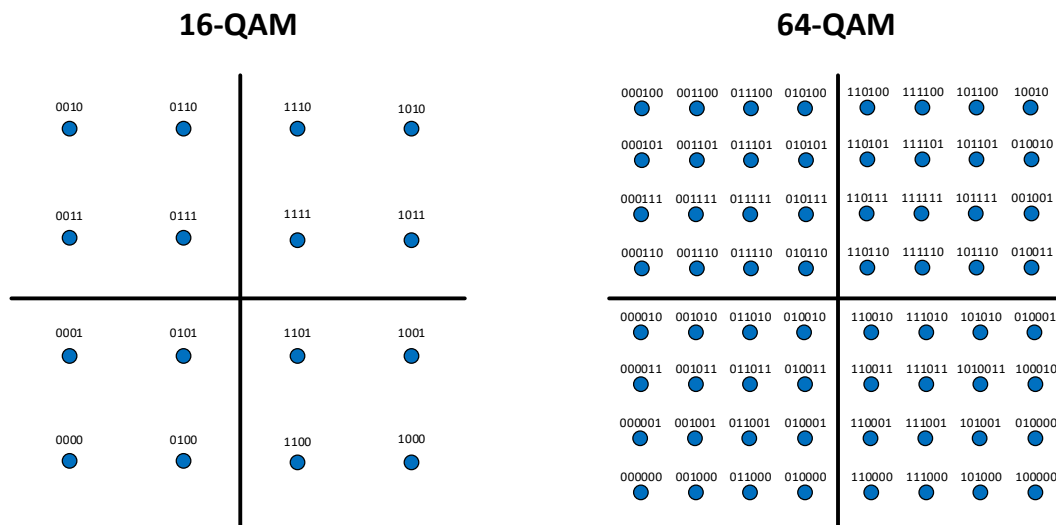
Je vyvinutých mnoho variácií PSK, každá z nich má svoje výhody a nevýhody.

Modulačný formát Non-Return-to-Zero (NRZ) patrí medzi najnákladnejšie modulačné formáty v optických komunikačných systémoch. Jeho kladnou vlastnosťou je najmä malá šírka elektrického pásma, nie je citlivý na laserový fázový šum a vyznačuje sa jednoduchou konfiguráciou vysielačov a prijímačov. NRZ patrí medzi číslicové modulácie, preto je jeho signál tvorený na základe dvoch stavov a to logickej jednotky a nuly. Logickú jednotku naberá celý bitový interval a signál počas celého trvania bitového intervalu sa nedostáva k logickej nule. Intenzita signálu sa mení striedaním jednotiek a núl v závislosti na zmene signálu. Logická jednotka predstavuje fázu π . Modulačný formát NRZ svojim konceptom nie je vhodný pre použitie v optických trasách s vysokou prenosovou kapacitou taktiež s prenosom na veľké vzdialenosti z dôvodu svojej jednoduchosti. Z historického hľadiska sa považuje za skvelý referenčný bod v porovnaní s ostatnými modulačnými formátmi [11].

Return-to-Zero (RZ) je modulačný formát, ktorý v porovnaní s NRZ pracuje so signálom a prichádza k nule. Šírka impulzu je kratšia ako šírka intervalu a následne padne na logickú nulu. RZ je typ modulácie, ktorá signál NRZ privedie do druhého modulátora so sínusovou riadiacou funkciou. RZ modulácia má väčšiu spektrálnu šírku ako v porovnaní s NRZ a aj preto je vhodnejšou voľbou pri použití v optických trasách s vysokou hustotou alebo pri veľkých vzdialenostiach. Pre riadenie optickej amplitúdy sa využíva Mach-Zehnder modulátor, ako aj v prípade NRZ. Ďalším typom modulácie je Chirped RZ (CRZ), vychádza práve z RZ modulácie. Má širšie optické spektrum pri väčších vzdialenostiach komunikačných sietí a tým sa znižuje aj účinnosť modulácie. Svoje uplatnenie v praxi získa najmä z dôvodu jej odolnosti voči nelineárnym javom. Pre riadenie využíva 3 Mach-Zehnder modulátory. Medzi typy modulácie RZ patrí aj Carrier-Suppressed Return-to-Zero (CSRZ). Fáza pulzu sa mení o π každou nasledujúcou bitovou periódou. Tento fakt má zásadný dopad na rozkladné ovplyvňovanie nosnej frekvencie. Pri riadení modulácie sa využívajú dva Mach-Zehnder modulátory [11].

Quadrature Amplitude Modulation (QAM) je jednou z najpoužívanejších modulačných formátov, ktoré sa využívajú v komunikačných systémoch. Je založená

na kombinácií amplitúdového a fázového kľúčovania. Pri modulovaní sa využívajú dva sínusové signály s konštantným kmitočtom, ktoré sú vzájomne fázovo posunuté o 90° . Vďaka tomuto posunu sú v kvadratúre fázovo rozdelené a jednotlivé signály majú pridelený názov I alebo Q. Výsledný signál je poskladaný z kombinácií oboch nosičov I a Q. QAM modulácia sa môže použiť v dvoch formátoch analógová alebo digitálna. Analógová QAM modulácia sa využíva pri prenose viacerých analógových signálov na jednej nosnej frekvencii. V televíznych systémoch túto moduláciu využívajú PAL (Phase Alternating Line) alebo NTCS (National Television System Committee) systémy, v rádiovkej komunikácii sa používa pri AM (Amplitude Modulation) vysielaní. Digitálna QAM modulácia svoje uplatnenie nájde v dátovej komunikácii, či už v rádiovom, televíznom ale aj telekomunikačnom vysielaní. V prípade telekomunikačných systémov je QAM veľmi využívaný v porovnaní s inými moduláciami, pretože má schopnosť prenášať dáta v hustých systémoch a na veľké vzdialenosti. QAM sa veľa krát označuje ako MQAM, v tomto prípade písmeno M pred názvom označuje počet signálových prvkov viď obr. 2.1. Najčastejšie sa v praxi využívajú kombinácie 4QAM, 16QAM, 64QAM, 256QAM.

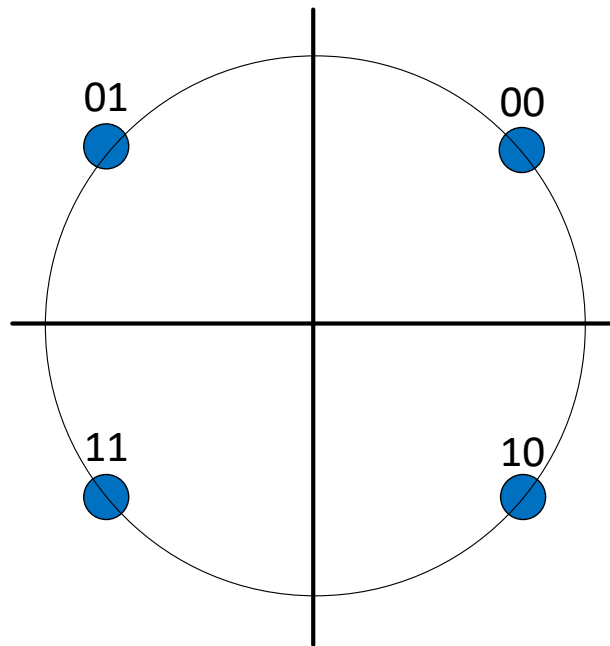


Obr. 2.1: Konstelačný diagram pre modulácie 16QAM a 64QAM.

Využitím modulačných formátov vyššieho radu je možné vysielat viac bitov naraz a tým zvýšiť rýchlosť prenosu. Nevýhoda takéhoto prenosu je v hustote jednotlivých bodov v konstelačnom diagrame a tým je tento prenos náchylnejší na chyby a šum. Z tohto dôvodu sa modulačné formáty vyššieho radu používajú len v prípade, kedy je zabezpečený vysoký pomer šumu k sile signálu. Konstelačný diagram je typ grafu, v ktorom sú jasne vyznačené body (bity) pre daný typ modulácie [12].

Medzi najnovšie trendy v modulovaní optických signálov je používanie Polarization Division Multiplexing QPSK (PDM-QPSK). Myšlienkou vývoja PDM-QPSK je zvýšenie celkovej kapacity siete. Tento typ modulácie sa využíva najmä v DWDM sieťach s prenosovou rýchlosťou nad 800 Gbit/s na jeden kanál v pásme 192,6-193,4 THz. Má vynikajúcu odolnosť voči lineárnym poruchám. Chromatická disperzia môže byť kompletne kompenzovaná za pomoci filtra s konečnou impulzovou odozvou (FIR). Nevýhodou je zložitá implementácia a vysoké náklady na transcievery a vysoká spotreba energie [13].

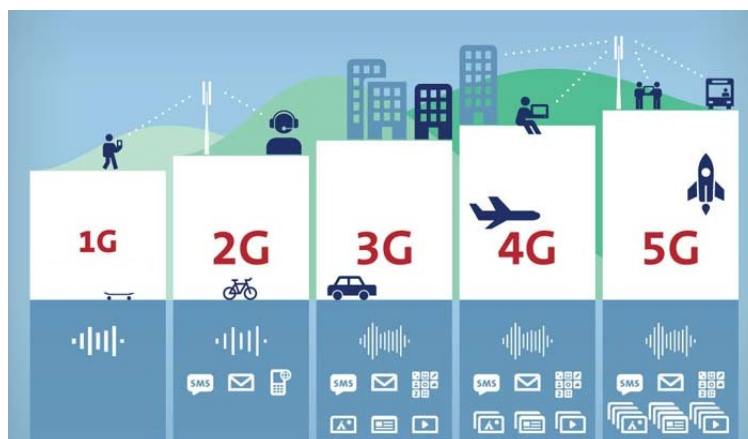
Modulácia DQPSK (Quadrature Phase Shift Keying) je svojím spôsobom jednoduchá a zároveň veľmi vhodná na použitie v rádiových komunikáciách, rovnako ako pri QAM moduláciách tak aj tu sa moduluje amplitúdová a frekvenčná časť optického spektra. Namiesto jedného bitu na symbol sa v tejto modulácii prenášajú dva pomocou I a Q nosičov. Najväčšou nevýhodou DQPSK je fázový posun medzi oscilátorov v prijímači a vysielači. pri Dokonalej DQPSK modulácii by boli tieto sínusoidy vyrovnané tzn. mali by rovnakú fázu a frekvenciu. Znázornenie konstelačného diagramu viď obr. 2.2.



Obr. 2.2: Konstelačný diagram pre DQPSK.

3 Porovnanie 4G a 5G sietí

Celý rozvoj mobilných komunikačných sietí začal sieťou 1G (First Generation). Túto sieť tvoril systém NMT (Nordic Mobile Telephone), bol to analógový systém, ktorý fungoval naprieč Európou a využíval frekvencie 453-457,5 MHz. Dosah vysielaču bol v rozmedzí 2-30 km. Nástupcom bola 2G (Second Generation) sieť. Táto fungovala na systéme GSM (Global System for Mobile), v tomto prípade sa jedná už o digitálny signál. Fungovala na frekvenciách 926-960 MHz. Práve siete druhej generácie otvorili dvere využívaniu dát pomocou mobilných zariadení aj keď to nebolo hlavnou prioritou. 3G (Third Generation) sieť bola prevádzkovaná na systéme UMTS (Universal Mobile Telecommunications System). Vysielacie frekvencie boli od 2110 až do 2170 MHz. Pri 3G sieti sa dalo hovoriť už o zmysluplnom prenose dát. Systém HSPA+ (Evolved High Speed Packet Access plus) dosahoval maximálne až 448 Mbit/s. Príchod 4G (Fourth Generation) znamenal začiatok zmeny v telekomunikačných spoločnostiach. Tie sa začali orientovať skôr na dátové služby a hlasové alebo textové služby išli do úzadia. 4G funguje na systéme LTE (Long Term Evolution), vysiela sa na frekvenciách v rozmedzí 800-2600 MHz. Nástup väčšej šírky pásma zabezpečil aj vyššiu prenosovú rýchlosť. Tá dosahovala veľkosť okolo 2,6 Gbit/s. V posledných rokoch sa pre ešte väčšie rýchlosti využívajú technológie Massive MIMO (Multiple Input Multiple Output). Je to základný pilier pri následnom budovaní 5G (Fifth Generation), siete pretože využívajú podobnú technológiu. Massive MIMO sa svoje fungovanie využíva viac ciest šírenia mobilného signálu, napr. medzi mobilným zariadením a vysielačom [14] [15]. Porovnanie poskytovaných služieb naprieč generáciami viď obr. 3.1.



Obr. 3.1: Prehľad poskytovaných služieb naprieč generáciami [16].

Výsledné navýšenie rýchlosti je minimálne dvojnásobné. Všetko závisí od šírky pásma na akom sa vysiela. Poslednou a najnovšou mobilnou sieťou je 5G. Je po-

stavená na systéme NR (New Radio) a je vo fáze prípravy na nasedenie do praxe (v niektorých štátoch už funkčná).

3.1 Technológie prenosu

Medzi mobilnou sieťou štvrtej a piatej generácie je veľký rozdiel, nie len z pohľadu tej viditeľnej formy (to čo je na stožiaroch a na strechách budov), ale aj to čo je uložené v zemi. Rovnako ako generácia piata tak aj tá štvrtá bola založená na optickej technológii. Pri 4G ešte neboli potrebné tak vysoké prenosové kapacity a latencia spojenia okolo 5 ms a menej. Optická sieť pri 4G bola založená najčastejšie na štandarde GPON (Gigabit Passive Optical Network). Prenosové rýchlosti siete založená na štandarde GPON dosahovali 2,5 Gbit/s v smere down a 1,25 Gbit/s v smere up. Novšie BS (Base Station), pri ktorých sa budovala alebo rekonštruovala používaná optická infraštruktúra, využíva novší štandard 10G-PON (10 Gigabit Passive Optical Network). Tento štandard ponúka viac možností a výhod. Najväčším benefitom je navýšenie rýchlosti na 10 Gbit/s v smere down a 1 Gbit/s v smere up. Menili sa aj vlnové dĺžky, na ktorých sa dáta prenášali.

Tab. 3.1: Prehľad vlnových dĺžok [1].

| Štandard | Vlnová dĺžka down [nm] | Vlnová dĺžka up [nm] |
|----------|------------------------|----------------------|
| GPON | 1480-1500 | 1290-1330 |
| 10GPON | 1570-1600 | 1270-1360 |

Tab. 3.2: Prehľad rýchlosti prenosu [1].

| Štandard | Rýchlosť down [Gbit/s] | Rýchlosť up [Gbit/s] |
|----------|------------------------|----------------------|
| GPON | 2,5 | 1,25 |
| 10GPON | 10 | 1 |

Najnovšie 5G sa projektujú na NG-PON (Next-Generation Passive Optical Network), NG-PON2 (Next-Generation Passive Optical Network version two), prenosové rýchlosti v tomto štandarde sú 80 Gbit/s v smere down a 20 Gbit/s v smere up. Do budúcnosti sa počíta so štandardom NG-PON2 v kombinácii s mutiplexorom typu UDWDM (Ultra Dense Wavelength Division Multiplexing), nazýva sa UWDM-PON a jej prenosové rýchlosti dosahujú v prípade jednovideového vlákna vzdialenosť 80km až 1,3 Tbit/s. Merania na takejto sieti však prebiehajú len experimentálne. Siete so štandardom GPON a NG-PON fungujú na rovnakej optickej distribučnej sústave. Ďalší rozdiel medzi 5G a 4G je v technológií vysielačov. Jedná sa o použitie

štandardu CPRI (Common Public Radio Interface) v prípade 4G sietí a nasadenia inovovaného štandardu eCPRI (Enhanced Common Public Radio Interface) v prípade 5G. Nárast dát v 5G sietí zapríčinil toto inovovanie a potrebu presunúť časť funkcií z prvku BBU (Baseband Unit) do RRH (Remote Radio Head) [17].

Tab. 3.3: Porovnanie kľúčových parametrov 4G a 5G [18].

| Parameter | 4G | 5G |
|-----------------------------------|-------|------|
| Pripojenia na km | >200k | >1m |
| Oneskorenie prenosu dát (ms) | >50 | <1 |
| Mobilita pripojenia (km/h) | >80 | >500 |
| Maximálna rýchlosť dát (Gbit/s) | <1 | >20 |
| Hustota pripojenia (Tbit/s) | <1 | >10 |
| Užívateľská rýchlosť dát (Gbit/s) | <0,1 | >1 |

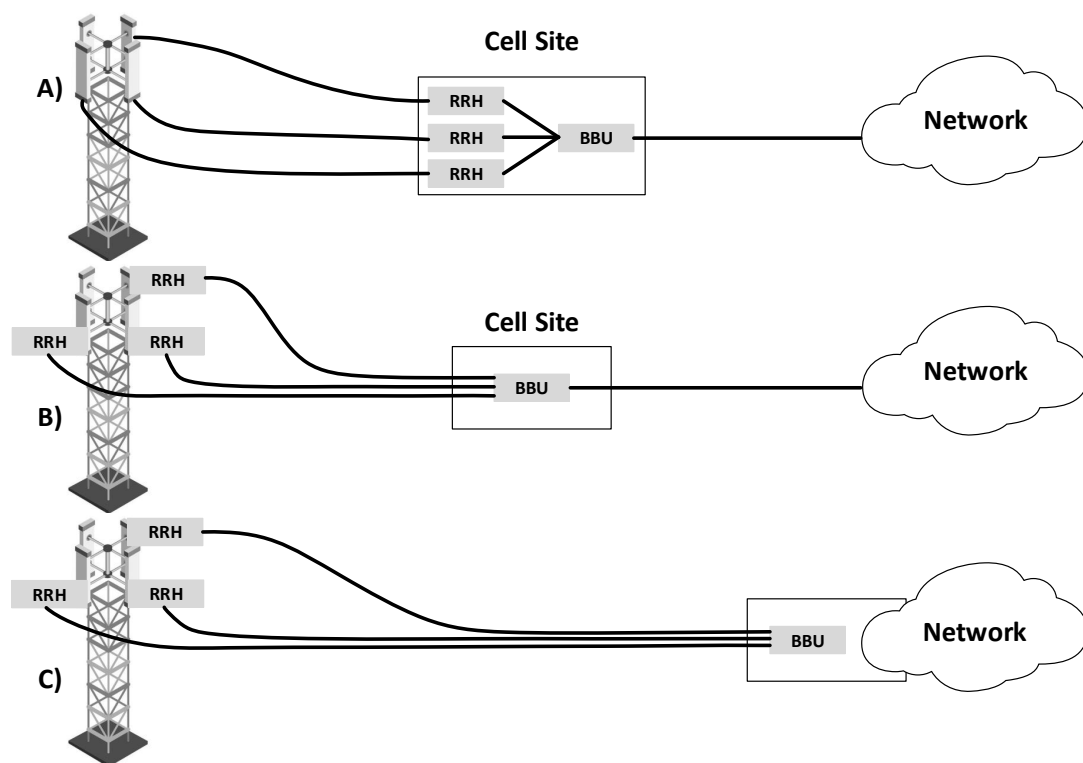
3.2 Architektúra základňovej stanice

Základňové stanice sú základnými prvkami, ktoré tvoria pozemnú sieť pre fungovanie mobilnej komunikácie. Architektúra medzi 4. a 5. generáciou mobilných sietí sa mierne zmenila. Ide najmä o prvky danej siete.

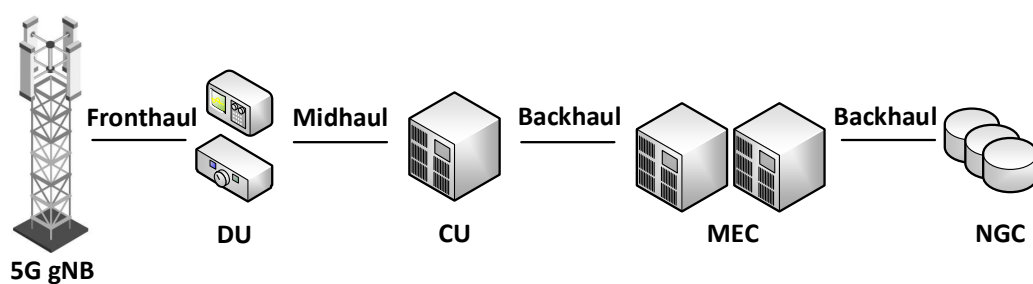
Základňová stanica v 4G je tvorená dvoma základnými prvkami. RRH obsahuje vysokofrekvenčné vysielacie a prijímače, ktoré sú pripojené k anténe. BBU tento prvok BS (Base Station) premieňa digitálny signál alebo ho spracováva. Príklady zapojenia základových staníc v 4G sieťach viď obr. 3.2.

V klasickej základňovej stanici sú oba prvky (RRH a BBU) umiestnené v jednom kabinete, ktorý sa nachádza len pár metrov od antény. Kabinet je následne spojený so sieťou pomocou blackhaul a spojenie medzi kabinetom a anténou je pomocou koaxiálneho kábla. Ďalší príklad základňovej stanice je tvorený spôsobom, že prvok RRH je spojený s anténou na veľmi malú vzdialenosť, napr. anténa a RRH sa nachádzajú na vrchole vysielacieho a prvok BBU sa nachádza v kabinete pod vysielateľom. RRH a BBU je spojený pomocou optického vlákna a rozhrania CPRI. Tretím príkladom základňovej stanice je prípad, kedy je RRH blízko antény avšak BBU sa už nenachádza v kabinete, ale je súčasťou siete operátora. V tomto prípade sa vynecháva funkcia kabinetu. Hlavnú úlohu optickej komunikácie zohráva fronthaul. Prenosová kapacita v tomto prípade je na úrovni až niekoľko stoviek Gbit/s.

Základňová stanica v 5G je rozdielna ako v prípade 4. generácie viď obr. 3.3. Do mobilnej optickej siete operátora je pripojený prvok CU (Central Unit), DU (Distributed Unit), RU (Remote Unit) NGC (Next Generation Core), MEC (Multi-Access



Obr. 3.2: Prehľad zapojenia základňových staníc.



Obr. 3.3: Prehľad zapojenia 5G BTS.

Edge Computing). Infraštruktúra používaná pre systém 5G obsahuje viacero technológií súčasne, ako napr. NGPON, CWDM, DWDM, eCPRI, RATIO, atď. Všetky tieto technológie vyžadujú spoločnú kompatibilitu. Z dôvodu vysokých nárokov na šírku pásma a rýchlosť mobilnej siete 5G je potrebné inštalovať optické káble až po antény [19]. Takáto sieť je oveľa komplikovanejšia, ale to len z pohľadu rozdelenia prvku BBU na viacero prvkov. Toto robí 5G sieť oveľa dynamickejšiu a viac zameranú na užívateľa práve rozdelením funkcií BBU medzi RU, CU, DU a to pri naša spoľahlivejšie služby pre zákazníka a iné miesta, kde sú umiestnené antény. 5G siete využívajú vo svojej topológii skôr malé bunky ako v porovnaní so 4G, ktoré využívajú macro stanice. Charakteristiku jednotlivých staníc viď tab. 3.4.

Tab. 3.4: Typy buniek [20].

| Typ stanice | Vnútorňý vysielací výkon [W] | Vonkajší vysielací výkon [W] | Dosah vysielania [m] |
|-------------|------------------------------|------------------------------|----------------------|
| Macro | - | >10 | >1000 |
| Micro | - | 5-10 | 100 |
| Pico | 0,1-0,35 | 1-5 | 10 |
| Femto | 0,01-0,1 | 0,2-1 | 10 |

Macro stanice využívajú operátory na pokrytie najväčšej oblasti s dosahom až niekoľko kilometrov. Sú umiestnené na stožiaroch, bytových, kancelárskych budovách, alebo popri železnici, diaľnici. Micro stanice nájdu svoje využitie v miestach, kde je signál z macro staníc slabší, hustota obyvateľstva je tam ale stále vysoká. Majú malé rozmery a preto sa dokážu najľahšie zamaskovať. Pico bunky sa využívajú predovšetkým v kancelárskych budovách, alebo v podzemných garážach. Femto stanica má najmenšie rozmery zo všetkých staníc a využíva sa najmä v domácnostiach pre internetové pripojenie „na doma“ [21].

3.3 Baseband Unit (BBU)

BBU je prvkom mobilnej časti siete od operátora ku zákazníkovi. V prípade 4G sietí sa vývoj základových staníc s najväčšou pravdepodobnosťou ukončil a operátori sa budú snažiť ju už len udržiavať. Pokrytie je na dostatočnej úrovni a prenosové kapacity taktiež. Preto sa väčšina telekomunikačných spoločností zameriava na návrh a rozvoj 5G sietí. BBU je logický prvok siete, ktorý spracúva digitálny signál. Ten je následne spojený s RRU pomocou CPRI/eCPRI interface. Táto jednotka sa najčastejšie nachádza mimo blízkosti antén ale najmä v kabinetoch spolu s napájacou technikou a záložným zdrojom. V prípade 4G je samotná jednotka BBU prepojená

s RRU (Remote Radio Unit) pomocou CPRI. V 5G sieťach je to veľmi podobné. BBU sa rozdelilo na viac logických prvkov CU a DU. Prvok CU poskytuje pre BS podporu protokolov, s ktorými pracuje vyššia vrstva. DU poskytuje podporu protokol na nižšej vrstve, ako je napr. fyzická vrstva. BS pri 5G pozostáva z jedného CU ale zároveň dokáže obslúžiť viacero DU prvkov. Každý DU dokáže pracovať s jednou bunkou, v tom je podstatný rozdiel medzi 4G a 5G. V prípade 4G dokáže jeden BBU obslúžiť len jednu bunku. Pri 5G ich dokáže obslúžiť viac. Antény môžu byť na viacerých miestach v menších prevedeniach a bez nutnosti výstavby nových základových staníc pre každý vysielateľ [22].

3.4 Remote radio head (RRU)

Je to ďalší prvok BS, ktorý premieňa digitálny signál na rádiový a je priamo spojený s BBU pomocou optického vlákna. Rozdiel medzi 4G a 5G sieťou už nie je taký veľký ako v prípade BBU. RRU je prepojená s koncovým zariadením na strane operátora s anténou. Táto časť je najviac viditeľná aj pre užívateľov siete. Hlavnou úlohou je modulovať a demodulovať celý signál, ktorý je prenášaný alebo prijímaný. V prípade 5G sietí sa RRH skladá z prvku RU a vysielacích/prijímacích antén, ten je spojený pomocou optického vlákna a eCPRI s prvkami DU a CU. V tomto prípade bolo nevyhnutné inovovať interface CPRI na verziu eCPRI. RU sa pri 5G sieťach často nachádza aj niekoľko kilometrov od BBU a na jednu BBU je pripojených niekoľko RU súčasne. Aj vďaka tomuto riešeniu dokážu 5G siete preniesť mnohonásobne viac dát a pripojiť viac koncových zariadení na jeden vysielateľ. Ďalším podstatným rozdielom pri tomto prvku BS je ich energetická spotreba. 5G siete sa usilujú o jej zníženie čo má za následok aj nižšie prevádzkové náklady z pohľadu operátora.

4 5G siete

Mobilné siete 5G prinášajú veľký progres v rádiových prístupových sieťach a predovšetkým rozvoj v sieťovej infraštruktúre. Mobilná sieť 5G je nástupom dlho využívanej 4G siete. Nasadenie sietí piatej generácie je veľmi dôležité na najbližší rozvoj medicíny, automobilového priemyslu ale aj samotný rozvoj domácností, najmä v spojení s IoT (Internet of things), teda v spojení domácností s inteligentnými zariadeniami a objektami. 5G technológia je od počiatku navrhnutá na podporu prudkého rastu počtu zákazníkov, zariadení a najmä preneseného počtu dát. Zásadnou zmenou pre koncových používateľov bude nutná zmena zariadení ako sú mobilné telefóny, pretože väčšina z nich ešte nie je schopná pracovať s 5G technológiou. Požiadavky na 5G siet:

- Prenosová rýchlosť minimálne 8 Gbit/s na strane používateľa.
- Lepšie pokrytie obyvateľstva signálom, aj na menej prístupných miestach ako sú podzemné garáže, metro.
- Jednotky tisícov aktívnych pripojení.
- Nové služby pre zákazníkov ako napr. IoT, VR (Virtual Reality)[23].

Veľkou témou pri nasadzovaní 5G technológií je aj šírenie hoaxov. Tie sú založené na klamlivých informáciách a nepodložených zdrojoch.

4.1 Technológia 5G

Vývoj rádiových sietí bol charakterizovaný rôznymi inováciami. Každá nová generácia sa vyznačovala novými vlastnosťami, ktoré boli lepšie tie z v predchádzajúcej generácie. Postupne sa zlepšoval výkon siete a služby, ktoré dokázali operátori ponúknuť zákazníkom. S príchodom mobilných sietí piatej generácie prichádzajú aj nové technológie a nové zariadenia. 5G siete dosahujú vyššie dátové rýchlosti pri vyšších frekvenciách (v pásmach nad 6 GHz) Taktiež sa využívajú aj nižšie frekvencie (v pásmach nad 20 MHz). Dané frekvenčné pásmo dokáže využívať len jeden operátor.

Na Slovensku sa používajú v prvom rade frekvencie z pásma 700 MHz. Tieto frekvencie sú vhodné skôr na pokrytie dedín alebo menších mestských častí. V súčasnosti operátori využívajú aj vyššie frekvencie v rozhraní 3,4-3,8 GHz. Používajú sa napr. na LTE-Advanced, alebo na pilotné spúšťanie 5G siete. V najbližších rokoch sa budú prideliť frekvencie na rozhraní 1,5-25 GHz, plánuje sa vysielanie 5G sietí v pásmach 24,25-27,5 GHz. Vďaka tomuto kroku bude možné vysielť na 400 MHz kanáloch a tým sa dosiahne prenosová rýchlosť 160 Gbit/s, s latenciou nižšou ako 1ms.

Z pohľadu zákazníka bude prístup k 5G sietí bezdrôtový, väčšina zaostávajúcej infraštruktúry bude využívať optické vlákna. Dôležitú úlohu pre správne fungovanie 5G sietí zohráva práve optická infraštruktúra, ovplyvňuje rôzne aspekty pri komunikácii medzi anténami a sieťami. Dostupnosť optickým sietí naprieč krajinou v prístupnom prostredí zvýši ultra širokopásmové pripojenie. Optické prenosové systémy predstavujú základnú podporu pri budovaní základňových staníc architektúry RAN (Radio Access Network).

Mobilní operátory pri budovaní svojej optickej infraštruktúry pre najnovšiu generáciu mobilných sietí využívajú siete s označením NG-PON (v blízkej budúcnosti NG-PON2). Nadchádzajúce mobilné siete 5G budú vyžadovať prístupové siete založené na technológii UDWDM a tiež so zlúčením s optickou fronthoul sieťou. 5G sieť má byť pre ľudí čo najlepšie dostupná. Prenosová rýchlosť na úrovni macro cell vysielacej bunky sa očakáva rýchlosť prenosu na úrovni 8 Gbit/s a s latenciou pod 1 ms [24].

Celá 5G sieť je navrhnutá tak aby bola energeticky úspornejšia ako predchádzajúca generácia. Ako aj v rámci 4G siete tak aj 5G sieť dokáže pracovať s technológiou massive MIMO, čo faktor pre zvýšenie kapacity tejto siete. Pri využití milimetrových vĺn, ako je to v prípade 5G sietí, musí sa počítať s postupnou degradáciou signálu na ceste od vysielača ku prijímateľovi. Jedným z riešení je využitie menších prístupových bodov, ako sú macro, pico a femto bunky, ktoré budú vysielaný signál šíriť v menej prístupných miestach. Ďalším problémom potom bude množstvo pripojených užívateľov na jednu z týchto buniek, pretože micro bunka má násobne viac voľných portov, ako pico bunky nainštalované niekde v administratívnej budove.

4.2 Optická infraštruktúra v SR

Pokrytie štátu optickou sieťou je dôležitým nie len z dôvodu poskytovania komerčných služieb pre domácnosti a telekomunikačné spoločnosti, ale tiež pre významné inštitúcie, ako napr. školy, železnice, diaľnice. Slovenská republika sa zaviazala Európskej únii že do roku 2020 bude 100% časť slovenská pokrytá internetovým pripojením nad 30 Mbit/s a 50% rýchlosťou 100 Mbit/s. do roku 2025 sa plánuje 100% pokrytie pripojením s minimálne 100 Mbit/s linkou s možným navýšením na 1 Gbit/s [16].

Slovensko sa taktiež zaviazalo na nasadení 5G sietí do väčšiny mestských častí a popri hlavných koridoroch ako sú železnice a diaľnice spájajúce naše najväčšie mestá. Koncom novembra 2020 prebehla na Slovensku dražba o príslušné frekvencie pre telekomunikačné firmy. Vydražili sa frekvencie 700, 900 a 1800 MHz. Práve tento regulačný krok rozviazal telekomunikačným firmám ruky a môžu naplno budovať svoje 5G siete a inovovať svoju optickú infraštruktúru [16].

Spoločnosť SANET (slovenská akademická sieť) prevádzkuje na Slovensku svoju vlastnú chrbticovú optickú infraštruktúru. Na prenos využíva mnohovidové optické vlákno a prenosovú rýchlosť 800 Gbit/s na vzdialenosť 150 km zabezpečuje koherentný PtP DWDM systém. V súčasnosti táto spoločnosť disponuje dvoma 800 Gbit/s kanálmi a do budúcnosti sa plánuje jej rozšírenie na 5 kanálov. Túto sieť tvoria viaceré okruhy, čím je zabezpečená jej funkčnosť aj po vypadnutí jedného zo segmentov. Do SANETu sa môže pripojiť akákoľvek verejná organizácia alebo aj súkromná osoba za ročný členský poplatok [25].

V prípade telekomunikačného operátora ako je napr. Slovak Telekom je to mierne odlišné. Táto spoločnosť prevádzkuje na Slovensku optickú sieť s architektúrou FTTH. Prenos je zabezpečený pomocou technológie GPON a TDM (Time-division multiplexing). Sieť ponúka rýchlosti pripojenia 20 Gbit/s v smere down a 10 Gbit/s v smere up [26].

4.3 eCPRI

CPRI existuje už nejakú dobu. Pri použití v 5G sieťach však musí prejsť vylepšením. RRU sú v celulárnej sieti distribuované každých pár kilometrov v mestách alebo na vidieku. Optické vlákno spája RRU s BBU. Toto spojenie sa nazýva fronthaul. V sieti piatej generácie sa využíva eCPRI. Funguje na rovnakom princípe ako CPRI v 4G, tzn. komunikuje medzi BBU a RRU. Je to sériové rozhranie, ktoré odosiela údaje prostredníctvom optického vlákna. Má vysokú kapacitu spojenia, čo je práve pri 5G problém. Vlákno medzi RRU a BBU prenáša oveľa viac dát ako to bolo napr. pri použití v 4G sieti a to práve sťažuje sériové rozhranie. Požiadavky 5G sa dotýkajú zväčšenia šírky pásma. eCPRI rozdeľuje hlavné funkcie základňovej stanice a čiastočne ich prenáša na RRU a to všetko s dôvodom zníženia záťaže na optickom vlákne. Nasadenie tejto technológie prináša vyššiu priepustnosť siete s menším počtom vlákien [27].

Fronthaul predstavuje fyzické spojenie medzi RRH a DU prvkami. Fronthaul sa využíval aj v 4G sieťach kvôli potrebe práve spojenia RRH a BBU, keďže sa prvky RRH inštalovali bližšie ku anténe. Backhaul tvorí spojenie medzi CU a optickou sieťou mobilného operátora [28] [29].

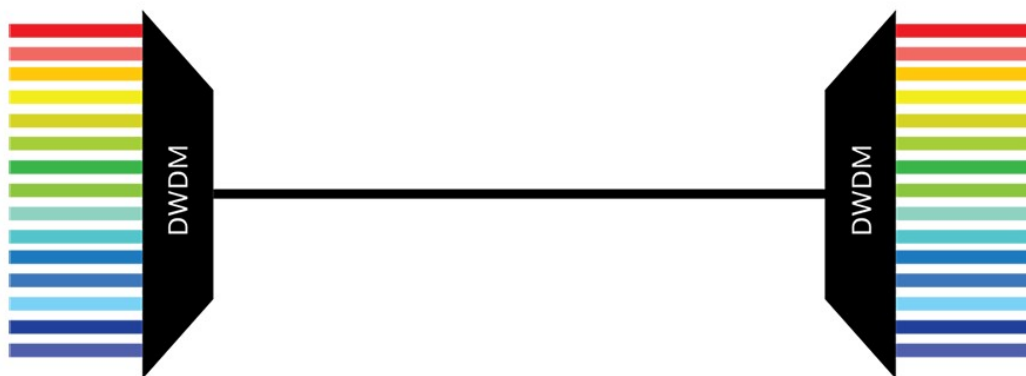
4.4 Optická sieť

Hlavným cieľom mobilných operátorov je priniesť pre zákazníkov najlepšie služby s čo najväčším ziskom. Preto je dôležité myslieť pri budovaní nových BS aj na

finančnú náročnosť celej investície. Pred samotným spustením technológie predchádzajú náročné prípravy ako územné rozhodnutia pre výstavbu BS, výkopy novej optickej siete alebo návrh celej infraštruktúry, atď. Jedným z najnáročnejším z pohľadu financií je pre poskytovateľa budovanie novej optickej siete. Z dôvodu dosiahnutia čo najlepších výsledkov v záverečných meraniach je dôležité zvoliť správne parametre siete. Budovanie 5G sietí znamená nutnosť pripojiť celý site na optickú sieť najnovšej generácie a myslieť tak do budúcnosti aj na nové štandardy. Pre operátora je dôležité spojiť funkčnú optickú sieť, namodrenejší rádiový prístup v časti nazvanej fronthaul s kombináciou najmodernejších techník riadenia siete, ako je napr. SDN (Software-Defined Networking). Od 5G sa očakáva, že optické prenosové systémy nebudú dlhú dobu stagnovať ale naďalej vyvíjať a posúvať hranice prenosu. Optická sieť v 5G je typu NG-PON alebo NG-PO2 a využíva husté multiplexovanie typu DWDM.

4.4.1 DWDM

DWDM poskytuje viacero možností ako upravovať rozstupy vlnových dĺžok medzi jednotlivými kanálmi. Možnosť vloženia viacerých vlnových dĺžok do jedného optického vlákna je podstatné pre budovanie 5G sietí a dosiahnutia dostatočných kapacít pre jej správne fungovanie viď obr. 4.1. Z pohľadu vysielača je možné použiť optický vysielač typu ILD, pretože rozstupy medzi jednotlivými vlnovými dĺžkami sú menšie ako 1 nm. V prípade že sa jedná o veľmi vyťaženú linku, je možné nasadenie aj nasadenie UDWDM. Ten využíva 100-200 Gbit/s kanály. Pri použití multiplexov je potrebné pri návrhu počítať s externými vplyvmi, ktoré pôsobia na výsledné prenosové kapacity [30] [31].



Obr. 4.1: DWDM architektúra [30].

4.4.2 UDWDM

Dôvodom vzniku UDWDM multiplexového systému bolo navýšenie kapacity optickej siete. Využitie tohto systému je výhodné z hľadiska jeho funkčnosti. UDWDM dokáže filtrovať optický signál podľa jednotlivých vlnových dĺžok a tým zabezpečuje vyššiu citlivosť v porovnaní s inými typmi multiplexorov. Využitie UDWDM v praxi prináša aj nevýhody. Keďže frekvenčná mriežka multiplexoru je úzka, to znamená že využité vlnové dĺžky a ich spektrálne zložky navzájom interferujú a tým vznikajú degradácie BER. Využitie Tx (filter spektrálneho tvarovania) zabezpečuje zníženie modulovanej šírky spektra a tým aj vzájomnú interferenciu susedných vlnových dĺžok. UDWDM využíva vlnové dĺžky pre prípad použitia v NG-PON2 sieti v rozmedzí od 1603-1625 nm, medzery medzi vysielanými vlnovými dĺžkami je v rozmedzí 6,25-12,5 GHz. Tým sa udáva aj počet kanálov. Pri použití medzier na úrovni 6,25 GHz sa dá využiť 640 kanálov a pri použití 12,5 GHz medzery sa počet kanálov pohybuje na úrovni 320 čo predstavuje presnú polovicu. Kapacita takejto siete sa pohybuje na úrovni 1 Tbit/s [32]. Súčasnú optickú infraštruktúru mobilných operátorov sú založené na technológii PON. Tie však nie sú schopné umožniť také veľké množstvo pripojení, ktoré sú potrebné pre 5G. Z tohoto dôvodu budú vo väčšine prípadov prebiehať transformácie sietí PON na UDWDM PON, ktoré sú schopné zvládnuť veľmi vysoký počet vlnových dĺžok s ultra úzkym rozstupom [33].

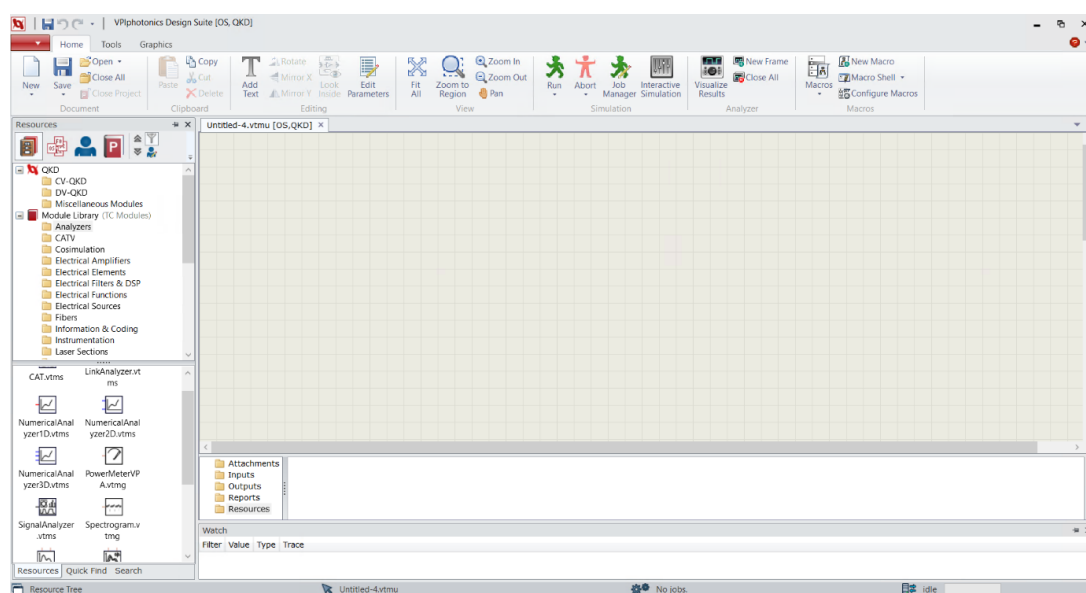
4.4.3 NG-PON2

NG-PON2 sieť vychádza zo základov GPON siete. Jej fungovanie nadväzuje na použitie multiplexoru typu DWDM pretože sa viaceré vlnové dĺžky vysielajú v jednom optickom vlákne. Táto sieť sa môže ďalej označovať aj ako DWDM-PON sieť. Táto sieť je schopná dosahovať priepustnosť 320 Gbit/s. Prenosová rýchlosť je 1,2 Tbit/s pre smer down a 640 Gbit/s pre smer up. Dosah je na úrovni okolo 40 km pri optimálnych prenosových vlastnostiach optického vlákna a použití kvalitného optického vysieláča [34]. PON siete závisia na deliacom pomere a metóde zakončenia optického vlákna. Deliaci pomer závisí od počtu koncových zariadení pripojených na optickú sieť. V dnešnej dobe je deliaci pomer v rozsahu 1:2 až 1:256. Pri budovaní siete je potrebné zvážiť práve tento údaj, pretože čím vyšší je pomer tým sa zvyšuje aj útlm.

5 Návrh optickej infraštruktúry pre 5G

V rámci praktickej časti Bakalárskej práce bude navrhnutá optická sieť pre mobilné siete 5. generácie. Návrh a simulácia bude prebiehať prostredníctvom program VPIphotonics. Výsledné simulácie budú zapísané do prehľadných tabuliek a následne do grafov pre ich lepšie vzájomné porovnanie. Hlavná pozornosť sa bude upriamovať najmä na porovnanie modulačných formátov, vlnových dĺžok a typov optických káblov.

VPIphotonics je profesionálny software pre návrh fotonických obvodov, optických prístrojov, optických trás a optických spojov. Pri vypracovaní bakalárskej práce bol použitý modul VPItransmissionMaker na vytváranie a simuláciu optických trás. Tento modul poskytuje prístup k vytváraniu krátkych sa aj diaľkových trás. Pre vývojárov je v ponuke mnoho optických prvkov ako vysielacie, prijímacie, vlákna, analyzátory atď. Vo vrchnej časti programu sa nachádzajú karty Home, Tools a Graphic, ktoré slúžia na ovládanie prostredia. Hlavnou časťou programu vid' obr. 5.1. Na karte Home sa nachádzajú subkarty napr. na uloženie projektu ovládanie prostredia alebo spustenie resp. zastavenie simulácie. V ľavej časti sa nachádzajú knižnice s prvkami na tvorbu topológie siete alebo vybrané demo verzie už dopredu nachystaných projektov.



Obr. 5.1: Pracovná plocha VPIphotonics.

Hlavnou časťou programu je vývojové prostredie, na ktoré sa pridávajú optické alebo elektrické prvky z ponuky. Na tomto mieste sa vytvára celá schéma modelu optickej vláknovej infraštruktúry. V spodnej časti sa po spustení simulácie objavujú

buď varovné výpisy, ktoré upozorňujú na chybné nastavenie parametrov blokov alebo výpisy oznamujúce úspešné simulovanie. Modely vytvorené v prostredí VPItransmissionMaker sa používajú ako nástroj na výskum, vývoj a na hodnotenie nových vytvorených produktov, komponentov a optimalizáciu rôznych optických systémov.

Prvou časťou bolo vybranie vhodných optických prvkov a následné vytvorenie modelu siete. Následne bolo potrebné v každom prvku nastaviť príslušné parametre podľa potrieb výkonu danej siete. V poslednej časti prebehla simulácia a nastávajúce okomentovanie výstupov.

5.1 Topológia

Navrhnutá optická trasa sa skladá z hlavných častí ako je OLT (Optical Line Termination), ODN (Optical Distribution Network), ONU (Optical Network Unit), viď obr. 5.2. Prvou je OLT. Tu sa nachádzajú tri moduly. Najvýznamnejším je Tx-mQAM, ktorý slúži ako univerzálny optický vysielateľ určený pre modulácie M-QAM, M-PSK, D-M-PSK. Podporuje stupne fázovania 2-4096. Využíva rôzne architektúry modulátorov ako napr. single drive MZMs, pair of dual drive MZMs atď. Modul sa skladá z laserového zdroja, generátora bitovej sekvencie, ovládačov, MZ modulátorov.

Tab. 5.1: Parametre vysielача.

| Parameter | 16QAM | 64QAM | DQPSK |
|------------------------------|----------------------------|-------|-------|
| BitRate [Gbit/s] | 50 | | |
| BitsPerSymbol | 4 | 6 | 2 |
| NumberOfSymbols | 1024 | | |
| LaserEmissionFrequency [GHz] | 193.1-184.4 228.4-201.1 | | |
| LaserAveragePower [mW] | 6 | | |
| LaserLinewidth [kHz] | 20 | | |

Pre účely simulácie sa nastavovali rôzne parametre. Výstupom z tohoto modulu je optický signál, ktorý vstupuje do časti zabezpečujúcej prenos v optickom prostredí. Z dôvodu analýz a kontrol vstupného optického signálu sa v topológii nachádzajú dva moduly pre vyhodnocovanie prenosových parametrov. PowerMeterVPA slúži na meranie a zobrazenie výkonu optického signálu vrátane všetkých šumov a parazitných signálov. Modul obsahuje možnosti na nastavenie obmedzenia šírky pásma, polarizácie, výstupných jednotiek a funkciu prepínania rôznych typov signálov. Namerané hodnoty sa zobrazia vo vsakovacom okne po spustení simulácie. SignalAnalyzer je najzákladnejším modulom na vyhodnocovanie elektrických

a optických signálov, ktorý VPIphotonics poskytuje. Pracuje v režime spracovania jedného alebo viacerých optických signálov. Pre simuláciu poskytuje napr. analyzátor optického spektra, optický alebo elektrický osciloskop, rádio-frekvenčný spektrálny analyzátor, eye diagram a funkciu odhadu hodnoty BER.

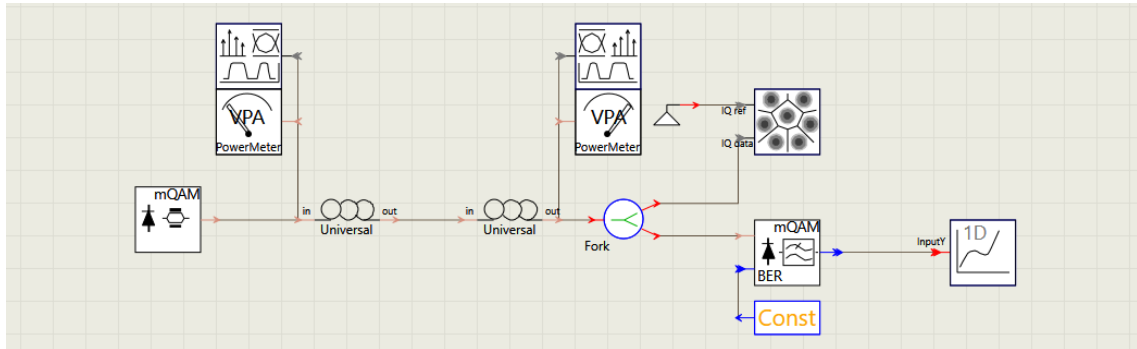
V druhej časti návrhu sa nachádzajú dve optické vlákna. Prvé z nich je konvenčné jednovidové optické vlákno UniversalFiberFwd, ktoré podporuje prenos optického signálu v optickom prostredí. Simuluje širokopásmový nelineárny prenos signálu vo vlákne. Poskytuje nastavenie rôznych parametrov a javov ako je napr. vzdialenosť, útlm, disperzia atď. Druhé vlákno predstavuje DCF (Dispersion Compensating Fiber) a slúži na potlačenie vzniknutej disperzie a tým hlavne zníženie chybovosti. Simulovaná dĺžka optickej trasy je 50km a túto vzdialenosť je potrebné rozdeliť medzi tieto dve optické vlákna. Posledným modulom v prenosovej časti návrhu je Fork, ktorý sa využíva najmä pri situáciách kedy je treba prepojiť do jedného výstupného portu viacero vstupných portov. V prípade tejto práce sa pripájajú moduly CAT (Constellation Analysis Tool) a Rx-mQAM-DSP-BER na jeden port výstupu optického vlákna.

Tab. 5.2: Parametre vlákna v topológii.

| Typ vlákna | Použitie | Dĺžka vlákna [km] | | | |
|------------|-------------|-------------------|---------|---------|---------|
| | | 1600 nm | 1550 nm | 1360 nm | 1310 nm |
| G.652.D | Optické | 43,2 | 44,59 | 48 | |
| | Kompenzačné | 6,8 | 5,41 | 2 | |
| G.655.D | Optické | 45,9 | 46,93 | 48,7 | 48,7 |
| | Kompenzačné | 4,1 | 3,07 | 1,3 | 1,3 |
| G.657.A | Optické | 43,2 | 44,22 | 46,8 | 47,3 |
| | Kompenzačné | 6,8 | 5,78 | 3,2 | 2,7 |

Poslednou časťou návrhu optickej trasy je OLU. Hlavným prvkom je optický prijímač Rx-mQAM-DSP-BER. Je to model optického koherentného prijímača, ktorý prijíma viaceré typy modulácií ako napr. M-QAM, M-PSK, D-M-PSK, je navrhnutý tak aby fungoval s vysielacom Tx-mQAM. Ďalej obsahuje prvok na digitálne spracovanie signálu, vyhodnocovať BER a v neposlednom rade prijímač odhaduje taktiež aj EVM a SER pomocou metód Gaussian a Monte-Carlo. Vstupom do prijímača je optický signál z optického vlákna a modul Const s konštantným signálom 0. Výstup je pripojený na modul NumericalAnalyzer1D. Je to analyzátor s jedným vstupom a výstupom pre numerické údaje. Vo výstupe simulácie môžu byť výsledky prezentované buď ako graf X/Y alebo list s údajmi. Druhým dôležitým modulom v tejto časti je CAT modul. Jeho prioritou je spracúvanie optického, elektrického modulovaného signálu alebo ich kombináciu. Modul podporuje modulácie konvenčné ale aj

kvadrátúrne modulácie. V prípade tejto simulácie spracúva primárne optický signál, ktorý prichádza z rozbočovača na prvý vstup modulu a druhým vstupom je referenčný signál, pochádzajúci z modulu NullSource. Ten predstavuje nulový zdroj pre signály ľubovoľného typu a využíva sa najmä na ukončenie nevyužitých vstupov/výstupov v moduloch.



Obr. 5.2: Topológia optickej siete.

5.2 Postup

Proces nastavenia simulácie pozostáva z priradení požadovaných hodnôt z parametrom jednotlivých modulov v topológii. Vysielač výkon je 6 mW a šírka vysielania lasera (LineWidth) 20 kHz. LineWidth v rozsahu 10-100 kHz sa dá považovať za reálny laser v oblasti koherencie. Laser s hodnotou LineWidth 0 Hz je možné považovať za dokonalý, avšak aj výsledky simulácie by boli dokonalé, ale nie reálne. Dôležitou súčasťou modulu vysielača je aj definovanie kanálu, aby mohol modul prijímača a modul konštruktívneho diagramu správne vyhodnotiť optický signál. Na všetkých simulovaných moduláciách je snaha dosiahnuť prenos s rýchlosťou 50 Gbit/s. Výpočet Prenosovej rýchlosti je nastavený v parametroch SymbolRate, BitRate, BitsPerSymbol. Pre globálne nastavenia týchto hodnôt je potrebné upraviť simulácia pomocou funkcie Macro. Funkcia automatického nastavenia globálnych parametrov pridá do simulácie nové parametre, ktoré uľahčia nastavovanie parametrov. K BitRate na strane vysielača je priradený súčin hodnôt zo SymbolRate a BitsPerSymbol. Pre reálnejšie výsledky simulácie sa parameter NumberOfSymbols nastavil na hodnotu 1024 symbolov.

Medzi sledované parametre bude patriť vstupný výkon optického spektra na začiatku univerzálneho optického vlákna, ďalším typom sledujúceho parametra je výstupný výkon optického spektra na výstupe z kompenzačného optického vlákna. Podstatným parametrom prenosu optického systému je aj bitová chybovosť BER

a konštelačný diagram. BER vyjadruje číselnú chybovosť v optických systémoch. Hodnota blížiac sa k 0 znamená, že prenosový kanál má minimálnu chybovosť. Hodnota BER blížiac sa k hraničnej hodnote 1 znamená, že na strane prijímača je signál silno deformovaný a ťažko použiteľný. Chybovosť sa dá znížiť napr. znížením symbolovej rýchlosti, dĺžkou optického vlákna atď. Bežné digitálne modulácie charakterizuje hodnota BER na úrovni minimálne $10^{-9} - 10^{-12}$. Pri viacstavových moduláciách sa minimálna chybovosť BER musí dostať nad úroveň 10^{-3} .

Možností ako navýšiť prenosovú kapacitu alebo znížiť bitovú chybovosť je mnoho. Za zmienku však stojí napr. využitie duálny polarizačný prenos tzn. optický signál sa prenáša v dvoch polarizačných rovinách, horizontálnej a vertikálnej. Tým pádom ak je systém schopný rozoznať na strane prijímača tieto dve polarizačné roviny, získa optický systém prenos dvojnásobných hodnôt. Ďalším pozitívnym prínosom, pre zlepšenie prenosu signálu môžu byť mnohovidové optické vlákna alebo multiplexor, avšak v tomto prípade sa začnú objavovať negatívne aspekty nelineárnych javov [1].

5.3 Simulácia

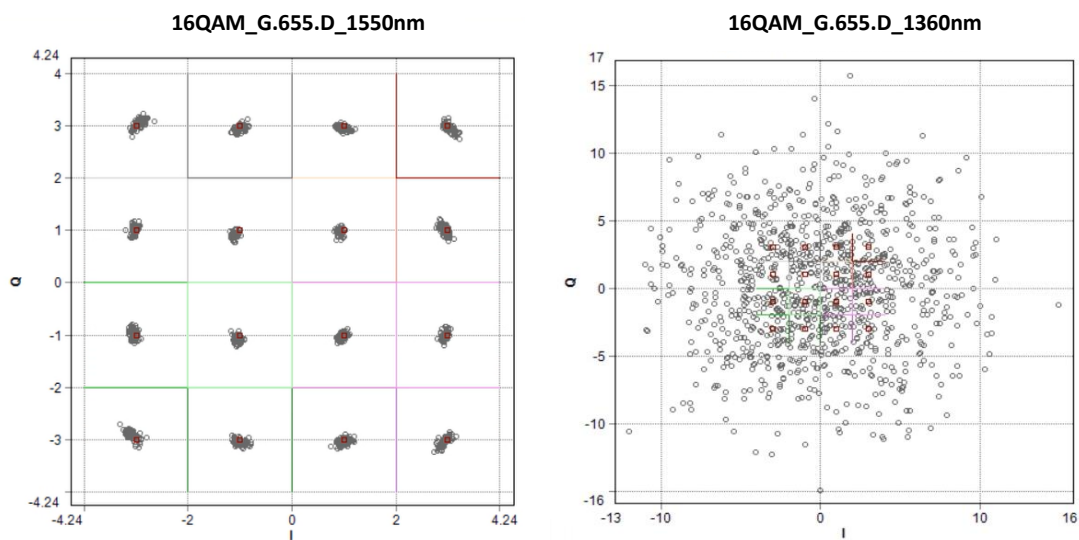
Prvou simuláciou vytvorenej topológie bude sledovaný stav modulácie 16QAM, s kombináciou vlákien typu ITU-T G.652.D, ITU-T G.655.D, ITU-T G.657.A a vlnové dĺžky 1600 nm, 1550 nm, 1360 nm, 1310 nm. Výsledky simulácie sú znázornené v tab. 5.3.

Tab. 5.3: Výsledky simulácie pre 16QAM.

| Vlnová dĺžka [nm] | Typ vlákna | Výstupný výkon [dBm] | Rozdiel výkonu [dB] | BER |
|-------------------|------------|----------------------|---------------------|-----------------------|
| 1600 | G.652.D | -18,212 | 17,448 | $1,24 \cdot 10^{-8}$ |
| | G.655.D | -11,992 | 11,228 | $2,00 \cdot 10^{-23}$ |
| | G.657.A | -17,383 | 16,619 | $9,37 \cdot 10^{-10}$ |
| 1550 | G.652.D | -14,342 | 13,578 | $2,13 \cdot 10^{-17}$ |
| | G.655.D | -10,824 | 10,06 | $2,00 \cdot 10^{-26}$ |
| | G.657.A | -14,234 | 13,47 | $4,44 \cdot 10^{-17}$ |
| 1360 | G.652.D | -21,125 | 20,361 | $1,03 \cdot 10^{-9}$ |
| | G.655.D | -49,664 | 48,9 | $8,10 \cdot 10^{-1}$ |
| | G.657.A | -20,622 | 19,858 | $7,23 \cdot 10^{-8}$ |
| 1310 | G.652.D | -20,165 | 19,401 | $9,32 \cdot 10^{-10}$ |
| | G.655.D | -19,471 | 18,707 | $7,32 \cdot 10^{-12}$ |
| | G.657.A | -19,885 | 19,121 | $3,99 \cdot 10^{-9}$ |

Ako už z tabuľky vyplýva, najnižšiu chybovosť BER dosahuje v modulácii 16QAM vlnová dĺžka 1550 nm, spolu s optickým vláknom typu ITU-T G.655.D. BER nad úroveň 10^{-3} dosiahli aj vlnové dĺžky 1660 nm spolu s 1310 nm a dajú sa taktiež

považovať za vhodné na prenos simulovaného optického systému. Vlnová dĺžka 1360 nm dosiahla neuspokojivý výsledok pri vláknu typu ITU-T G.655.D a to najmä kvôli vysokej úrovni útlmu. Na vstupe do optického vlákna mal signál úroveň $-0,76$ dBm. Optický signál na výstupe z kompenzačného vlákna mal najmenší pokles opäť pri 1550 nm a rovnakom type vlákna. Úroveň poklesu je 10,06 dB. Pri vlnovej dĺžke 1360 nm sa potvrdil predpoklad a pokles výkonu optického signálu je na úrovni až 48,9 dB. Porovnanie konštelačných diagramov je na obr. 5.3, z neho vyplýva aký markantný je rozdiel v chybovosti BER. Pri kvalitnom prenose sú jasne viditeľné všetky body modulácie. Z dôvodu vysokej chybovosti pri vlnovej dĺžke 1310 nm je konštelačný diagram zahľtený symbolmi a nie nemožné priradiť jednotlivé body, tak kam patria.



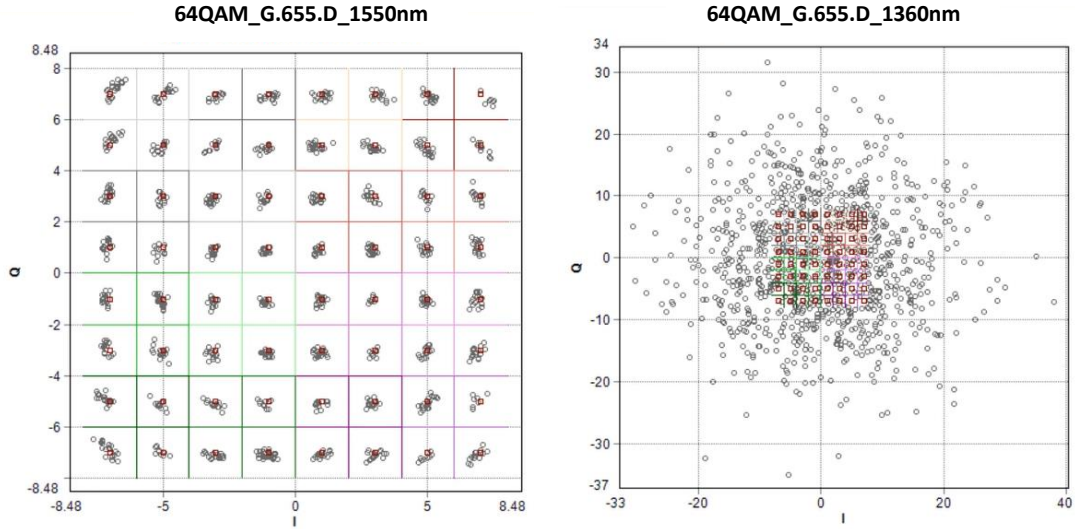
Obr. 5.3: Porovnanie konštelačného diagramu pre BER 10^{-26} a 10^{-1} .

Druhou simuláciou vytvorenej topológie bude sledovaný stav modulácie 64QAM, s kombináciou vlákien typu ITU-T G.652.D, ITU-T G.655.D, ITU-T G.657.A a vlnové dĺžky 1600 nm, 1550 nm, 1360 nm, 1310 nm. Výsledky simulácie sú znázornené v tab. 5.4.

Tab. 5.4: Výsledky simulácie pre 64QAM.

| Vlnová dĺžka [nm] | Typ vlákna | Výstupný výkon [dBm] | Rozdiel výkonu [dB] | BER |
|-------------------|------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| 1600 | G.652.D | -18,882 | 17,481 | $2,40 \cdot 10^{-2}$ |
| | G.655.D | -12,628 | 11,227 | $5,42 \cdot 10^{-5}$ |
| | G.657.A | -18,01 | 16,617 | $1,40 \cdot 10^{-2}$ |
| 1550 | G.652.D | -14,976 | 13,575 | $5,70 \cdot 10^{-4}$ |
| | G.655.D | -11,458 | 10,057 | $1,89 \cdot 10^{-5}$ |
| | G.657.A | -14,868 | 13,467 | $6,43 \cdot 10^{-4}$ |
| 1360 | G.652.D | -21,761 | 20,36 | $2,40 \cdot 10^{-2}$ |
| | G.655.D | -51,641 | 50,24 | $9,50 \cdot 10^{-1}$ |
| | G.657.A | -24,69 | 23,089 | $3,20 \cdot 10^{-2}$ |
| 1310 | G.652.D | -20,801 | 19,4 | $1,41 \cdot 10^{-2}$ |
| | G.655.D | -20,107 | 18,706 | $5,50 \cdot 10^{-3}$ |
| | G.657.A | -20,521 | 19,12 | $2,00 \cdot 10^{-2}$ |

Ako už z tabuľky vyplýva, Rozdiel medzi moduláciu 16QAM a 64QAM je obrovský. Najnižšiu chybovosť BER dosahuje vlnová dĺžka 1550 nm, spolu s optickým vláknom typu ITU-T G.655.D. BER nad úroveň 10^{-3} dosiahli aj vlnové dĺžky 1660 nm spolu s 1310 nm a dajú sa taktiež považovať za vhodné na prenos simulovaného optického systému. Jediným vhodným optickým vláknom popri parametroch, ktoré boli simulované je najvýhodnejšie optické vlákno ITU-T G.655.D, pri ostatných typoch vlákien bola chybovosť BER pod hranicou 10^{-3} a z toho dôvodu sa dá považovať modulácia 64QAM za nevhodnú. Na vstupe do optického vlákna mal signál úroveň $-1,4$ dBm. Optický signál na výstupe z kompenzačného vlákna mal najmenší pokles opäť pri 1550 nm a rovnakom type vlákna. Úroveň poklesu totožná ako pri predošlej modulácii. Pri vlnovej dĺžke 1360 nm sa opäť potvrdil predpoklad a pokles výkonu optického signálu je na úrovni až 50,24 dB. Porovnanie konštelčných diagramov je na obr. 5.4.



Obr. 5.4: Porovnanie konštelačného diagramu pre BER 10^{-5} a 10^{-1} .

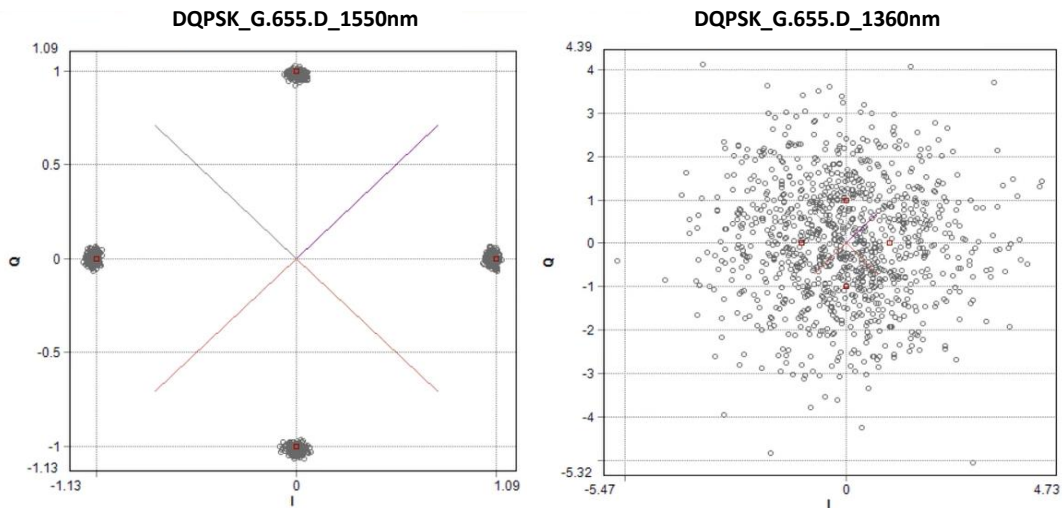
Tretou simuláciou vytvorenej topológie bude sledovaný stav modulácie DQPSK s kombináciou vlákien typu ITU-T G.652.D, ITU-T G.655.D, ITU-T G.657.A a vlnové dĺžky 1600 nm, 1550 nm, 1360 nm, 1310 nm. Výsledky simulácie sú znázornené v tab. 5.5.

Tab. 5.5: Výsledky simulácie pre DQPSK.

| Vlnová dĺžka [nm] | Typ vlákna | Výstupný výkon [dBm] | Rozdiel výkonu [dB] | BER |
|-------------------|------------|----------------------|---------------------|------------------------|
| 1600 | G.652.D | -25,853 | 22,35 | $3,14 \cdot 10^{-39}$ |
| | G.655.D | -17,669 | 14,166 | $3,70 \cdot 10^{-90}$ |
| | G.657.A | -24,991 | 21,487 | $1,07 \cdot 10^{-46}$ |
| 1550 | G.652.D | -20,739 | 17,236 | $1,57 \cdot 10^{-104}$ |
| | G.655.D | -15,561 | 12,147 | $1,86 \cdot 10^{-274}$ |
| | G.657.A | -20,876 | 17,373 | $3,78 \cdot 10^{-97}$ |
| 1360 | G.652.D | -25,861 | 22,358 | $2,15 \cdot 10^{-39}$ |
| | G.655.D | -53,699 | 50,196 | $4,80 \cdot 10^{-1}$ |
| | G.657.A | -26,555 | 23,052 | $3,61 \cdot 10^{-34}$ |
| 1310 | G.652.D | -25,078 | 21,575 | $4,07 \cdot 10^{-46}$ |
| | G.655.D | -23,62 | 20,118 | $9,24 \cdot 10^{-62}$ |
| | G.657.A | -25,558 | 22,055 | $7,13 \cdot 10^{-42}$ |

Rozdiel medzi moduláciou výsledkami QAM modulácií a DQPSK je veľmi veľký. Najnižšiu chybovosť BER dosahuje opäť vlnová dĺžka 1550 nm, spolu s optickým vláknom typu ITU-T G.655.D. BER nad minimálnu úroveň dosiahli aj vlnové dĺžky 1660 nm spolu s 1310 nm a v prípade DQPSK aj vlnová dĺžka 1360 nm aj keď iba

pri optických vláknach typu ITU-T G.652.D a ITU-T G.657.D a to najmä z dôvodu nižších hodnôt útlmu a disperzie. Na vstupe do optického vlákna mal signál úroveň $-3,5$ dBm. Úroveň poklesu rozdielna ako pri predošlých QAM moduláciách. Najväčší pokles je opäť pri vlnovej dĺžke 1360 nm s poklesom o $50,19$ dB. Porovnanie konštelačných diagramov je na obr. 2.2.



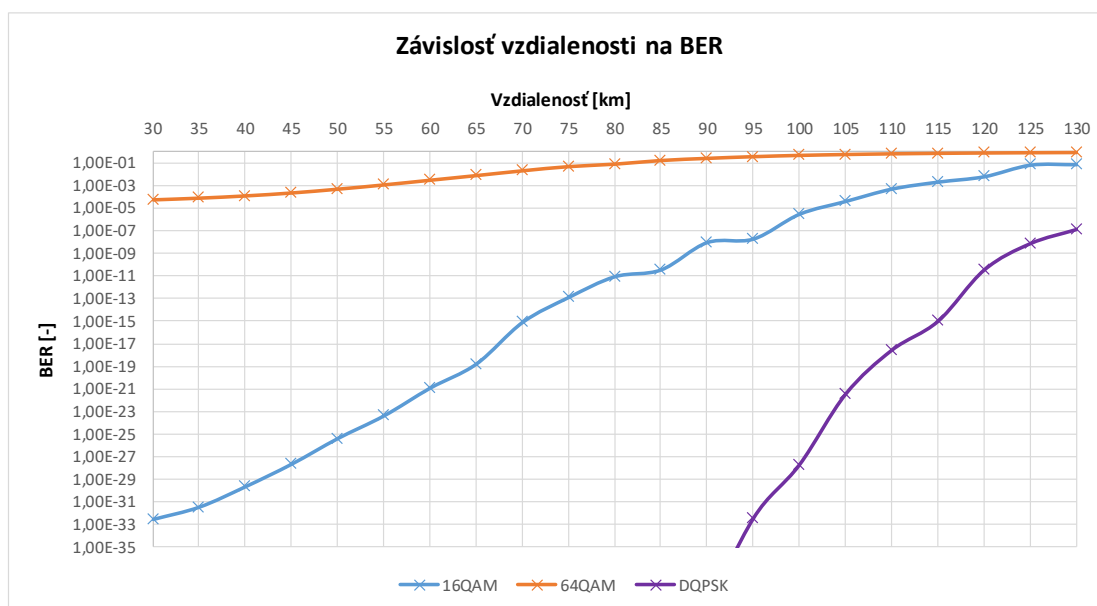
Obr. 5.5: Porovnanie konštelačného diagramu pre BER 10^{-247} a 10^{-1} .

Z predošlých simulácií vyplýva, že najvhodnejším typom optického vlákna je ITU-T G.655.D, spolu s vlnovou dĺžkou 1550 nm. Z dôvodu zistenia negatívneho vplyvu dĺžky vzdialenosti na hodnotu chybovosti BER sa simulovali všetky tri modulácie. Začiatok simulácie je pri 30 km a končí vo vzdialenosti 130 km s krokom 5 km. Pri nasledujúcej analýze sa porovnanie nevzťahuje na zmenu výkonu optického signálu. Výsledky simulácie viď tab. 5.6 alebo graf 5.6.

Tab. 5.6: Porovnanie modulácií s chybovosťou BER pre 16QAM, 64QAM a DQPSK.

| Vzdialenosť [km] | 16QAM | 64QAM | DQPSK |
|------------------|-----------------------|----------------------|------------------------|
| 30 | $2,57 \cdot 10^{-33}$ | $5,79 \cdot 10^{-5}$ | 0 |
| 35 | $3,19 \cdot 10^{-32}$ | $8,18 \cdot 10^{-5}$ | 0 |
| 40 | $2,08 \cdot 10^{-30}$ | $1,29 \cdot 10^{-4}$ | 0 |
| 45 | $2,09 \cdot 10^{-28}$ | $2,34 \cdot 10^{-4}$ | 0 |
| 50 | $2,93 \cdot 10^{-26}$ | $5,06 \cdot 10^{-4}$ | $5,85 \cdot 10^{-274}$ |
| 55 | $4,05 \cdot 10^{-24}$ | $1,21 \cdot 10^{-3}$ | $2,07 \cdot 10^{-228}$ |
| 60 | $1,17 \cdot 10^{-21}$ | $3,12 \cdot 10^{-3}$ | $1,83 \cdot 10^{-181}$ |
| 65 | $1,61 \cdot 10^{-19}$ | $8,04 \cdot 10^{-3}$ | $2,41 \cdot 10^{-145}$ |
| 70 | $7,92 \cdot 10^{-16}$ | $2,12 \cdot 10^{-2}$ | $1,33 \cdot 10^{-116}$ |
| 75 | $1,30 \cdot 10^{-13}$ | $4,96 \cdot 10^{-2}$ | $1,96 \cdot 10^{-92}$ |
| 80 | $9,00 \cdot 10^{-12}$ | $8,18 \cdot 10^{-2}$ | $1,63 \cdot 10^{-68}$ |
| 85 | $3,61 \cdot 10^{-11}$ | $1,72 \cdot 10^{-1}$ | $2,01 \cdot 10^{-53}$ |
| 90 | $9,67 \cdot 10^{-9}$ | $2,65 \cdot 10^{-1}$ | $8,37 \cdot 10^{-42}$ |
| 95 | $1,97 \cdot 10^{-8}$ | $3,75 \cdot 10^{-1}$ | $3,28 \cdot 10^{-33}$ |
| 100 | $3,17 \cdot 10^{-6}$ | $4,85 \cdot 10^{-1}$ | $1,94 \cdot 10^{-28}$ |
| 105 | $4,35 \cdot 10^{-5}$ | $5,81 \cdot 10^{-1}$ | $3,60 \cdot 10^{-22}$ |
| 110 | $5,36 \cdot 10^{-4}$ | $6,66 \cdot 10^{-1}$ | $2,87 \cdot 10^{-18}$ |
| 115 | $6,23 \cdot 10^{-3}$ | $7,36 \cdot 10^{-1}$ | $1,05 \cdot 10^{-15}$ |
| 120 | $6,69 \cdot 10^{-3}$ | $7,92 \cdot 10^{-1}$ | $3,73 \cdot 10^{-11}$ |
| 125 | $7,11 \cdot 10^{-2}$ | $8,38 \cdot 10^{-1}$ | $8,15 \cdot 10^{-9}$ |
| 130 | $7,86 \cdot 10^{-2}$ | $8,69 \cdot 10^{-1}$ | $1,46 \cdot 10^{-7}$ |

Vo vzdialenosti do 30 km vychádza zo simulácie, že všetky analyzované modulácie spĺňajú minimálne požiadavky na bitovú chybovosť. DQPSK vo vzdialenosti 30 km dosahuje až nulovú chybovosť, čo sa dá považovať za bezchybný optický systém. Tento stav pretrváva do vzdialenosti 45 km. S narastajúcou vzdialenosťou stúpa aj chybovosť BER. Minimálnu hranicu nad 10^{-3} modulácia DQPSK nedosiahla. Vzhľadom na skutočnosť, že simulácia podľa parametrov v tabuľkách 5.1 a 5.2, dosahuje takto nízku chybovosť, aj pri veľkej vzdialenosti a bez nutnosti použitia zosilňovačov, len optického vlákna, ktoré kompenzuje disperziu je veľmi dobrý výsledok. Modulácia 16QAM podľa tabuľky 5.6 je druhou najvhodnejšiu moduláciu. Vo vzdialenosti 30 km dosahuje hodnota BER úroveň 10^{-33} , tá sa dá považovať za dostatočnú a prenos na tejto vzdialenosti bol kvalitný a bez veľkého počtu chybných bitov. Minimálna hranica BER je dosiahnutá vo vzdialenosti 120 km. Modulácia 64QAM vykazuje veľmi slabé výsledky. BER 10^{-3} dosiahla vo vzdialenosti 65 km.



Obr. 5.6: Graf závislosti vzdialenosti na bitovej chybovosti.

Graf znázorňuje závislosť veľkosti vzdialenosti na bitovú chybovosť. Modulácia DQPSK nie je znázornená v celom rozsahu, z dôvodu prehľadnosti grafu. V prípade zobrazenia celého rozsahu DQPSK by priebehy modulácií 16QAM a 64QAM boli takmer nečitateľné. Modulácia 64QAM zobrazuje. Zo simulácií plynie že všetky modulácie sú schopné prenášať 50 Gbit/s, avšak len do určitej vzdialenosti. Pre každú moduláciu je táto vzdialenosť rozdielna.

Záver

Táto bakalárska práca sa zaoberala problematikou ohľadom využitia optickej infraštruktúry pre mobilné siete 5G. Tieto siete prinesú pre zákazníkov mnoho výhod v podobe lepšej konektivity, spoľahlivejších prenosových vlastností, ako je rýchlosť, dostupnosť pripojenia a nízka odozva. Pre správne fungovanie 5G sietí je nevyhnutné inovovať stávajúcu optickú infraštruktúru, ktorú využívajú mobilní operátori. Je potrebné zabezpečiť dostatočnú kapacitu a to sa dosiahne napr. využitím sietí typu NG-PON2, ktoré spĺňajú vysoké prenosové rýchlosti a dosah optického signálu bez výrazného zničenia alebo silného zašumenia na desiatky kilometrov.

Praktická časť bakalárskej práce bola zameraná na simuláciu optickej infraštruktúry pre mobilné siete 5G. Navrhnutá topológia bola odsimulovaná a analyzovaná v programe VPI photonics, pre tri rôzne viacstavové modulácie, tri rôzne typy optických jednovlnových vlákien a štyri rôzne vlnové dĺžky. Z výsledkom je zrejmé, že najvhodnejšou viastavovou moduláciou je DPQSK, poprípade 16QAM. Uspokojivé výsledky dosiala aj 64QAM, avšak len v prípade vlnovej dĺžky 1550 nm. Najvhodnejší typ optického vlákna je ITU-T G.655.D. Pri všetkých moduláciách a pri všetkých vlnových dĺžkach, s výnimkou 1360 nm neprekročila chybovosť minimálnu hranicu. Vlnová dĺžka 1360 nm bola zvolená ako neštandardná a simuláciou sa tento predpoklad overil. Hlavným dôvodom vysokej chybovosti pri tejto vlnovej dĺžke je najmä vysoká hodnota útlmu.

Druhá simulácia prebiehala na totožnej topológii a taktiež pre tri rôzne modulácie len pre vlnovú dĺžku 1550 nm a typ optického vlákna ITU-T G.655.D. Tu sa opäť overilo že modulácia DQPSK je najvhodnejšia a vykazuje výborné výsledky prenosu. V prípade vzdialenosti do 50 km bola hodnota BER na úrovni 0, čo znamená bezchybný prenos a ani na dĺžke optického vlákna 130 km chybovosť nedosiahla hraničných hodnôt.

Modulácia DQPSK, vlnová dĺžka 1550 nm a typ vlákna ITU-T G.655.D je kombinácia, ktorá zaručuje ten najlepší prenos optického signálu a je vhodným kandidátom pre použitie v mobilných sieťach 5G.

Literatúra

- [1] FILKA, Miloslav. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku* Druhé, rozšířené vydání. Brno: Prof. Ing. Miloslav Filka, Csc. a kol., 2017. ISBN 978-80-86785-14-1
- [2] BUBNÍK, Lukáš, Jiří KLAJBL a Petr MAZUCH. *Optoelektrotechnika* [online]. Code Creator, 2015 [cit. 2020-10-24]. ISBN MSMT-7521/2015-40. Dostupné z URL:
<<https://publi.cz/books/185/Cover.html>>
- [3] Jarosław Piotr Turkiewicz. *Cost-effective $n \times 25$ Gbit/s DWDM transmission in the 1310 nm wavelength domain*. [online]. 2011, 179-184 [cit. 2020-03-11]. ISSN 1068-5200. Dostupné z URL: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1068520011000150>>
- [4] D. Kiboi Boiyo, E.K. Rotich Kipnoo, T.B. Gibbon. *An integrated OADM based on Bragg trans-reflectance in 1550 nm VCSEL optical fibre access networks*. [online]. 2019, 478-482 [cit. 2020-03-10]. ISSN 0030-4026. Dostupné z URL: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030402618314669>>
- [5] *G.652 : Characteristics of a single-mode optical fibre and cable* [online]. Geneva, 2006 [cit. 2021-03-18]. Dostupné z URL: <<https://www.itu.int/rec/T-REC-G.652/en>>
- [6] *G.653 : Characteristics of a single-mode optical fibre and cable* [online]. Geneva, 2010 [cit. 2021-03-18]. Dostupné z URL: <<https://www.itu.int/rec/T-REC-G.653/en>>
- [7] *G.654 : Characteristics of a single-mode optical fibre and cable* [online]. Geneva, 2020 [cit. 2021-03-19]. Dostupné z URL: <<https://www.itu.int/rec/T-REC-G.654/en>>
- [8] *G.655 : Characteristics of a single-mode optical fibre and cable* [online]. Geneva, 2010 [cit. 2021-03-20]. Dostupné z URL: <<https://www.itu.int/rec/T-REC-G.655/en>>
- [9] *G.656 : Characteristics of a single-mode optical fibre and cable* [online]. Geneva, 2011 [cit. 2021-03-20]. Dostupné z URL: <<https://www.itu.int/rec/T-REC-G.656/en>>

- [10] *G.657 : Characteristics of a single-mode optical fibre and cable*[online]. Geneva, 2017 [cit. 2021-03-20]. Dostupné z URL:<<https://www.itu.int/rec/T-REC-G.657/en>>
- [11] Amandeep Kaur, Anu Sheetal, Rajan Miglani. *Impact of optical modulation formats on 10G/2.5G asymmetric XG-PON system*. [online] .Optik, Volume 149, 2017, Pages 351-358, ISSN 0030-4026. Dostupné z URL:<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030402617311245>>
- [12] Jong-Wan Kim, Chang-Hee Lee. *Modulation format identification of square and non-square M-QAM signals based on amplitude variance and OSNR*, *Optics Communications*. [online] .Volume 474, 2020, 126084, ISSN 0030-4018. Dostupné z URL:<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030401820305010>>
- [13] J. Renaudier, G. Charlet, O. Bertran-Pardo, H. Mardoyan, P. Tran, M. Salsi and S. Bigo *Transmission of 100Gb/s Coherent PDM-QPSK over 16x100km of Standard Fiber with erbium amplifiers*[online]. Opt. Express 17, 5112-5117 (2009) Dostupné z URL:<https://www.osapublishing.org/DirectPDFAccess/5FFAA2FB-71E6-4F87-938044DE0A46A0E2_177383/oe-17-7-5112.pdf?da=1&id=177383&seq=0&mobile=no>
- [14] *O krok bližšie k 5G*[online]. In: . 2019 [cit. 2020-11-19]. Dostupné z URL:<<https://www.telekom.sk/o-spolocnosti-telekom/press-centrum/tlacove-spravy/o-krok-blizsie-k-5g-slovak-telekom-otestoval-technologie-massive-mimo>>
- [15] QUAZI, Amjad, Sanjeev Kumar GUPTA a Paresh RAWAT. *IUP Journal of Telecommunications*[online]. 2020, 12(2), 7-17 [cit. 2020-11-22]. ISSN 09755551 Dostupné z URL:<<https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=bth&AN=146202176&lang=cs&site=ehost-live>>
- [16] *Atlas pasívnej infraštruktúry*[online]. [cit. 2020-12]. Dostupné z URL:<<https://minzp.sk/files/aktuality/su-api.pdf>>
- [17] GIUNTINI, Marco, Paolo GRAZIOSO, Francesco MATERA, Alessandro VALENTI, Vincenzo ATTANASIO, Silvia DI BARTOLO a Emanuele NASTRI. *Enabling Optical Network Test Bed for 5G Tests. Fiber* [online]. 2017, 36(1/2), 3-24 [cit. 2020-11-22]. ISSN 01468030. Dostupné z URL:<[doi:10.1080/01468030.2016.1262481](https://doi.org/10.1080/01468030.2016.1262481)>

- [18] Mikhail E. Belkin, Tatiana N. Bakhvalova, Alexander S. Sigov. *Design Principles of 5G NR RoF-Based Fiber-Wireless Access Network*. [online]. 2019. Dostupné z URL:<<https://www.intechopen.com/books/recent-trends-in-communication-networks/design-principles-of-5g-nr-rof-based-fiber-wireless-access-network>>
- [19] *5G and Fiber Optic Infrastructure*. [online]. 2021 [cit. 2021-4-27]. Dostupné z URL:<<https://telecom.samm.com/5g-and-fiber-optic-infrastructure>>
- [20] *A New Infrastructure For The IoE* [online]. Dostupné z URL:<<https://semiengineering.com/a-new-infrastructure-for-the-ioe/>>
- [21] *Základňové stanice mobilnej siete (BTS)* [online]. 2020, 28.6.2020 [cit. 2020-11-19]. Dostupné z URL:<<https://elektrosmog.voxo.eu/zakladnove-stanice-mobilnej-siete>>
- [22] *Opening the 5G Radio Interface* [online]. [cit. 2020-12]. Dostupné z URL:<<https://www.design-reuse.com/articles/48289/opening-the-5g-radio-interface.html>>
- [23] ALLEN, Jeffrey. *What Is 5G and Is It for Me?* [online]. 2020, 34(2), 63-66 [cit. 2020-11-22]. ISSN 08916330. Dostupné z URL:<<https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=143446847&lang=cs&site=ehost-live>>
- [24] LAGKAS, Thomas, Dimitrios KLONIDIS, Panagiotis SARIGIANNIDIS a Ioannis TOMKOS. *5G/NGPON Evolution and Convergence: Developing on Spatial Multiplexing of Optical Fiber Links for 5G Infrastructures*. [online]. 2020, 39(1), 4-23 [cit. 2020-11-22]. ISSN 01468030. Dostupné z URL:<[doi:10.1080/01468030.2020.1725184](https://doi.org/10.1080/01468030.2020.1725184)>
- [25] *Technológia: Fyzická infraštruktúra* [online]. [cit. 2020-12]. Dostupné z URL:<https://www.sanet.sk/?page_id=1376>
- [26] *Optický prístup (GPON technológia)* [online]. [cit. 2020-12]. Dostupné z URL:<<https://www.telekom.sk/wiki/ostatne/opticky-pristup-gpon-technologie>>
- [27] HARDESTY, Linda. *What is eCPRI, and why is it important for 5G and open vRAN?* [online]. 2019, , N.PAG [cit. 2020-11-22]. Dostupné z URL:<<https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=bth&AN=139165172&lang=cs&site=ehost-live>>

- [28] *Backhaul*. [online]. [cit. 2020-11-23]. Dostupné z URL: <<https://www.viavisolutions.com/en-us/solutions/contractors/backhaul>>
- [29] *What Is Fronthaul?* [online]. [cit. 2020-11-23]. Dostupné z URL: <<https://www.viavisolutions.com/en-us/fronthaul>>
- [30] VELÁSQUEZ, J. Camilo, Jeison TABARES, Iván N. CANO a Josep PRAT. *1.25-2.5 Gb/s Simple Nyquist Transmitters for Coherent UDWDM-PON with Enhanced Spectral Efficiency*. [online]. 2018, 37(4), 219-228 [cit. 2020-12-02]. ISSN 01468030. Dostupné z URL: <[doi:10.1080/01468030.2018.1461281](https://doi.org/10.1080/01468030.2018.1461281)>
- [31] *CWDM vs DWDM / Rozdiel medzi CWDM a DWDM* [online]. [cit. 2020-11-21]. Dostupné z URL: <<http://sk.fibresplitter.com/info/cw-dm-vs-dw-dm-difference-between-cw-dm-and-dw-d-37083482.html>>
- [32] KONSTANTINOU, Dimitrios, Thomas A.H. BRESSNER, Simon ROMMEL, Ulf JOHANNSEN, Martin N. JOHANSSON, Marianna V. IVASHINA, A. Bart SMOLDERS a Idelfonso TAFUR MONROY. *5G RAN architecture based on analog radio-over-fiber fronthaul over UDWDM-PON and phased array fed reflector antennas* [online]. 2020, 454, N.PAG [cit. 2020-12-02]. ISSN 00304018. Dostupné z URL: <[doi:10.1016/j.optcom.2019.124464](https://doi.org/10.1016/j.optcom.2019.124464)>
- [33] Dimitrios Konstantinou, Thomas A.H. Bressner, Simon Rommel, Ulf Johannsen, Martin N. Johansson, Marianna V. Ivashina, A. Bart Smolders, Idelfonso Tafur Monroy. *5G RAN architecture based on analog radio-over-fiber front-haul over UDWDM-PON and phased array fed reflector antennas*. [online]. Volume 454, 2020, 124464, ISSN 0030-4018. Dostupné z URL: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003040181930759X>>
- [34] *FTTH PON evolúcia: GPON na NG-PON2*. [online]. 2019, 24.6.2019 [cit. 2020-11-23]. Dostupné z URL: <<http://sk.fibresplitter.com/info/ftth-pon-evolution-gpon-to-ng-pon-37083466.html>>

Zoznam symbolov a skratiek

| | |
|---------------|---|
| λ | vlnová dĺžka |
| 10GPON | 10 Gigabit Passive Optical Network |
| 1G | First Generation |
| 2G | Second Generation |
| 3G | Third Generation |
| 4G | Fourth Generation |
| 5G | Fifth Generation |
| AM | Amplitude Modulation |
| ASK | Amplitude Shift Keying |
| BBU | Baseband Unit |
| BER | Bit Error Rate |
| BFSK | Binary Frequency Shift Keying |
| BS | Base Station |
| BTS | Base Transceiver Station |
| CAT | Constellation Analysis Tool |
| CPRI | Common Public Radio Interface |
| CRZ | Chirped RZ |
| CSRZ | Carrier Suppressed Return to Zero |
| CU | Central Unit |
| CWDM | Coarse Wavelength Division Multiplexing |
| DCF | Dispersion Compensating Fiber |
| DPSK | Differential Phase Shift Keying |
| DQPSK | Differential Quadrature PhaseShift Keying |
| DU | Distributed Unit |

| | |
|----------------|---|
| DWDM | Dense wavelength division multiplexing |
| eCPRI | Enhanced CPRI |
| EDFA | Erbium Doped Fiber Amplifier |
| FFTH | Fiber to the Home |
| FSK | Frequency Shift Keying |
| GPON | Gigabit Passive Optical Network |
| GSM | Global System for Mobile |
| HSPA+ | Evolved High Speed Packet Access plus |
| ILD | Injection Laser Diode |
| IoT | Internet of Things |
| ITU | International Telecommunication Union |
| LED | Light-Emitting Diode |
| LTE | Long Term Evolution |
| MEC | Multi Access Edge Computing |
| MIMO | Multiple Input Multiple Output |
| NGC | Next Generation Core |
| NG-PON | Next-Generation Passive Optical Network |
| NG-PON2 | Next-Generation Passive Optical Network version two |
| NMT | Nordic Mobile Telephone |
| NR | New Radio |
| NRZ | Non return to zero |
| NTCS | National Television System Committee |
| ODN | Optical Distribution Network |
| OLT | Optical line termination |
| ONU | Optical Network Unit |

| | |
|--------------|--|
| PAL | Phase Alternating Line |
| PMD | Polarization Mode Dispersion |
| PSK | Phase-shift keying |
| QAM | Quadrature Amplitude Modulation |
| QPSK | Quadrature Phase Shift Keying |
| RAN | Radio Access Network |
| RRH | Remote Radio Head |
| RRU | Remote Radio Unit |
| RU | Remote Unit |
| RZ | Return to Zero |
| SDN | Software-Defined Networking |
| SSMF | Standard Single Mode Fiber |
| TDM | Time-Division Multiplexing |
| UDWDM | Ultra Dense Wavelength Division Multiplexing |
| UMTS | Universal Mobile Telecommunications System |
| VR | Virtual Reality |